Conceção e simulação de uma célula robótica para operações de acabamento de guitarras feitas em materiais compósitos

Daniel Filipe Cândido Angelino

Dissertação do MIEM

Orientadores:

Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu

Prof. António Manuel Ferreira Mendes Lopes

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Julho de 2012

Aos meus pais

Resumo

A automação é um elemento cada vez mais presente no nosso quotidiano, não só em termos industriais mas também ao nível social. A automatização de processos industriais adotados pelas empresas tem uma importância fulcral para o aumento de produtividade e qualidade dos produtos finais.

A introdução dos robôs industriais em linhas de produção e em particular nas operações de acabamento, surge naturalmente através do desenvolvimento de mecanismos capazes de realizar tarefas que exigem uma mão-de-obra qualificada com custos associados mais reduzidos, sem que haja quebras na produção.

Na produção de guitarras feitas em materiais compósitos existe a necessidade de remover o material em excesso resultante do processo de fabrico das peças constituintes do corpo da guitarra.

Nesta dissertação foi desenvolvida uma célula robótica dedicada a operações de acabamento, em particular à rebarbagem (*trimming*) do corpo de uma guitarra feita em material compósito e testada a sua aplicabilidade. As peças ensaiadas foram fornecidas pela Ideia.m, empresa especializada no desenvolvimento de produtos feitos em materiais compósitos.

Inicialmente fez-se uma contextualização em termos industriais do tema proposto, de modo a compreender as particularidades de todo o processo e recolher informações acerca de soluções existentes no mercado.

Posteriormente, procedeu-se à programação *off-line* e respetiva simulação de uma solução, tendo como base a célula robótica disponível no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, utilizando para tal o software *RobotStudio* disponibilizado pela marca ABB.

Após ter sido feita a programação em ambiente virtual, procedeu-se à implementação da solução através da realização de vários ensaios, em diferentes modos de controlo, que testassem a aplicabilidade da mesma. A realização destes ensaios permitiu tirar várias conclusões em relação não só à aplicação em si e uma possível industrialização do processo, mas também aos recursos que foram utilizados e de que maneira contribuíram para os resultados obtidos.

Design and Simulation of Robotic Cell for Guitar Finishing Operations

Abstract

Automation is an element that is increasingly present in recent times, not only in industry but also at social level. The automation of industrial processes adopted by companies results on an increase of productivity and quality of their final products.

The introduction of industrial robots in production lines, and particularly in finishing operations, appears naturally through the development of mechanisms that performs highly technical skills tasks with lower associated costs and no breaks in production.

In the production of guitars made by composite materials, appears the need to remove the excess of material resulting from the manufacturing process of the guitar body parts.

In this dissertation is developed a robotic cell dedicated to finishing operations, in particular for grinding (trimming) a guitar body made by composite materials and tested its applicability. The tested parts were provided by Ideia.m, a Portuguese company specialized in development and production of products made by composite materials.

Initially was made an industrial context of main subject, in order to understand the characteristics of the process, collect information about existing market solutions and after that, was made an off-line programming and simulation of one solution which was created based on the robotic cell available in the Robotics Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Engineering of the University of Porto, and using ABB's available software, the RobotStudio.

Once the off-line programming was concluded, the solutions were implemented in real cell by performing various tests in different control modes. The completion of these tests allowed the achievement of several conclusions regarding not only the application itself and a possible industrialization of the process, but also the resources that were used and how they contributed to the final results.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Professor Paulo Abreu e Professor António Lopes, por todo o apoio, dedicação e disponibilidade prestada, e fundamentalmente pela partilha de conhecimentos que me permitiram ultrapassar as dificuldades que surgiram durante a realização desta dissertação.

Agradeço ao Professor Francisco Freitas, responsável pela unidade curricular Dissertação, por todo o acompanhamento ao longo do semestre e pelas críticas construtivas que tiveram sempre como objetivo melhorar a nossa prestação.

Quero também agradecer à empresa Ideia.m, em particular ao Eng.º. Júlio Martins e Eng.º João Petiz, por todo o apoio e também pelo material fornecido.

Ao Sr. Joaquim Silva, por toda disponibilidade e ajuda prestada.

A todos os meus amigos, por todo o acompanhamento, confiança e palavras de incentivo.

À Joana, obrigado por todos os momentos de felicidade, apoio e compreensão.

E por último, agradeço à minha família, em especial à minha irmã Laura e aos meus pais, Carlos Angelino e Natércia Angelino, por me darem esta oportunidade, me apoiarem e aconselharem de forma incondicional ao longo de toda esta etapa da minha vida, estando sempre presentes tanto nos bons como nos maus momentos.

Índice

Índice de Figuras

1. Introdução

Desde sempre, a evolução industrial teve como base o desenvolvimento de mecanismos que produzissem mais, melhor e com menos encargos associados, de forma a melhorar a qualidade de vida da Humanidade. A automação surge assim com a intenção de melhorar a qualidade de vida do Homem não só ao nível económico mas também ao nível ambiental e de segurança, proporcionando melhores condições de trabalho.

Num contexto mais industrial, pode definir-se a automação como uma tecnologia que engloba sistemas mecânicos e eletrónicos assistidos por computador na operação e controlo de produção [1]. Exemplos desta tecnologia podem incluir linhas de transferência, linhas de montagem, centros de maquinagem e robôs, tudo isto controlado por sistemas de supervisão/controlo.

No meio industrial, podem ser distinguidos três tipos de automação: automação dedicada, automação programável e automação flexível. A automação dedicada é mais indicada para tarefas específicas, mais concretamente quando o volume de produção é elevado e portanto a parte de projeto é fundamental uma vez que requer um investimento inicial muito elevado e a mudança de componentes ou produtos pode conduzir à obsolescência do sistema. Estes sistemas são eficientes e fiáveis e apresentam um custo de operação relativamente reduzido. Um exemplo de automação dedicada é facilmente encontrado na indústria automóvel, na produção de componentes do motor e transmissão, como se pode verificar na Figura 1.1.
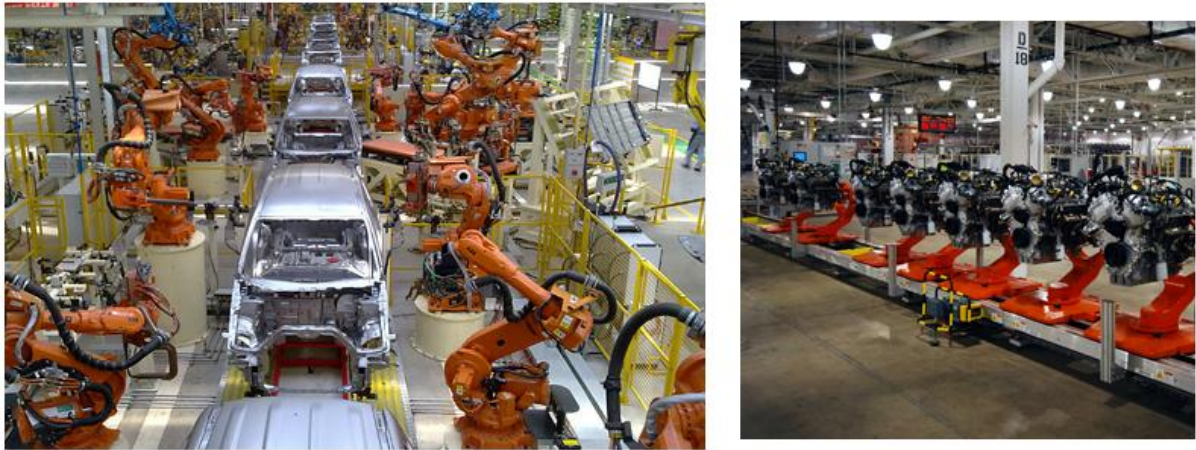
Figura 1.1 - a) Linhas de transferência numa fábrica de produção automóvel; b) produção em série de blocos do motor para indústria automóvel [2]

A automação programável, por outro lado, é mais utilizada quando o volume de produção é relativamente reduzido ou existe uma grande variedade de produtos a serem fabricados. Neste caso, o sistema de produção é facilmente adaptável a uma variação na configuração do produto e portanto existe a possibilidade de uma mistura variável de produtos caso seja uma produção contínua.

Como se pode ver pelo diagrama da Figura 1.2, a automação flexível está entre a automação dedicada e a automação programável.
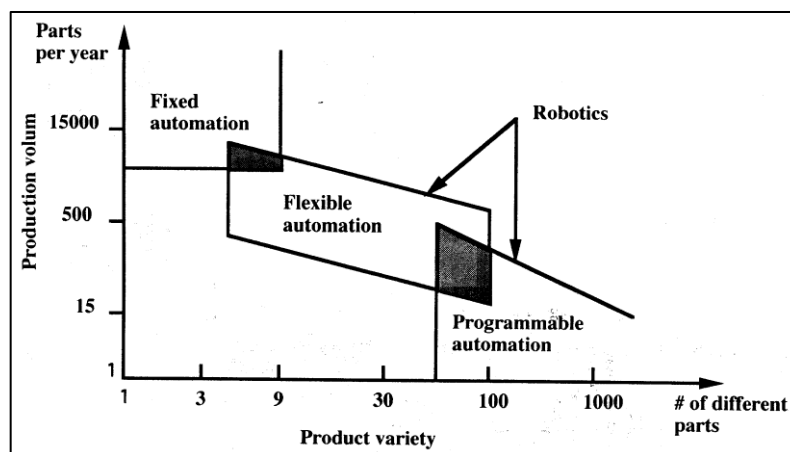
Figura 1.2 - Relação entre automação dedicada, automação programável e automação flexível em função do volume e variedade de produtos [1]

Pela sua posição relativamente aos outros tipos de automação, é presumível que a automação flexível tenha um pouco das características tanto da automação dedicada como da

automação programável. Verifica-se então que a automação flexível é programável para diferentes configurações de um dado produto, mas a variedade dessas configurações é de certa forma limitada. Uma das principais diferenças entre automação flexível e automação programável é que nesta última os produtos são produzidos em lotes e no fim do processo o produto pode ser reconfigurado; na automação flexível podem ser produzidos vários produtos ao mesmo tempo no mesmo sistema de produção.

Os robôs industriais são utilizados, como se pode ver na Figura 1.2, quer em sistemas de automação flexível quer em sistemas de automação programável.

1.1. Automação e Robótica

Um robô industrial, segundo a RIA (*Robotics Industries Association*), pode ser definido como um manipulador multifunções desenhado para movimentar material, peças ou mecanismos especializados através de vários movimentos programáveis para o desempenho de diversas tarefas [1].

O primeiro robô industrial surgiu em 1961 quando a marca Unimate se juntou à General Motors para criar um manipulador que trabalhasse numa máquina de fundição. Em 1974, a empresa sueca ASEA, desenvolveu o IRB6, o primeiro robô industrial totalmente elétrico. Este último trouxe muitas aplicações novas na área da robótica, que não eram possíveis de ser realizadas por sistemas hidráulicos, em particular a soldadura. O primeiro robô dedicado a operações de acabamento foi adquirido pela empresa sueca Magnusson e realizava operações de polimento em tubos de aço inoxidável (Figura 1.3).

Figura 1.3 - Primeiro robô dedicado a operações de acabamento [3]

Um robô industrial pode ser um grande contributo para uma empresa em termos de automatização de processos. Não só traz vantagens em termos de redução de custos associados ao processo (Tabela 1) e aumento da produtividade, mas também melhora as condições de trabalho ao nível da saúde e própria segurança.

Tabela 1 - Encargos com mão-de-obra estimados por Ron Potter (*Factory Automation Systems*) [4]

EUA	15 $/h
China	3 $/h
Robô Industrial	0,3 $/h

Desde o seu aparecimento que os robôs têm sido utilizados em processos de soldadura e transporte de material, com grandes resultados alcançados. Mais recentemente, foram feitos estudos que conduziram à aplicação de robôs articulados em operações de maquinagem e operações de acabamento tais como rebarbagem, lixagem e polimento (Figura 1.4), tirando assim partido de uma das principais características dos robôs industriais, a elevada repetibilidade.

Figura 1.4 - a) Robô dedicado a operações de maquinagem; b) operações de polimento; c) operações de soldadura [5]

1.1.1. Robótica em operações de rebarbagem

A rebarbagem é um processo de acabamento que tem como objetivo a correção de irregularidades em arestas ou apenas protuberâncias superficiais que necessitam de ser removidas em peças fundidas, soldadas ou maquinadas, sendo um processo bastante importante ao nível de qualidade e estética da peça.

A rebarbagem pode ser feita por vários métodos: químicos, térmicos ou mecânicos. No método mecânico, é utilizada uma ferramenta abrasiva constituída por partículas de material de elevada dureza.

Os robôs industriais são cada vez mais utilizados em operações de rebarbagem (Figura 1.5) devido à sua elevada repetibilidade, além de que não sofrem de fadiga comparativamente a um operário. No entanto, a maioria dos robôs utilizados em operações de rebarbagem são programados manualmente, o que requer um grande investimento em tempo de programação. Este é um aspeto que explica a ausência de robôs a efetuar operações de rebarbagem em algumas empresas, uma vez que não se justifica tal investimento no tempo de programação. Foi com base neste aspeto que várias marcas desenvolveram softwares que, através de modelos CAD 3D das peças, geram automaticamente as trajetórias para as operações de rebarbagem. Um exemplo é o *Machining Power Pack*, que é uma extensão do software *RobotStudio* da ABB e é dedicado a operações de acabamento.

Figura 1.5 - Manipulador com ferramenta dedicada a operações de rebarbagem [5]

1.2. Robô Industrial vs. CNC

Como já foi anteriormente referido, uma das grandes vantagens dos robôs industriais é a sua elevada repetibilidade que pode ser até ± 0.02 mm consoante o modelo e aplicação, e traduz a capacidade do robô regressar sempre ao mesmo ponto que foi ensinado, independentemente da carga, velocidade ou trajetória, desde que situadas dentro da gama suportada pelo robô.

Os robôs industriais possuem várias vantagens em relação às tradicionais máquinas de CNC, tais como: maior flexibilidade, menor custo inicial, etc. Recentemente têm sido feitos vários estudos utilizando a aplicação de controlo de força em operações de acabamento, de maneira a colmatar uma grande desvantagem dos robôs em relação às máquinas CNC: a sua baixa rigidez. Estima-se que a rigidez de um robô seja cerca de 50 vezes inferior à de uma máquina CNC [32], o que limita muito as forças envolvidas no processo e particularmente a maquinagem de peças com geometrias complexas.

1.3. Controlo de força

O controlo de força foi inicialmente aplicado a robôs utilizados em linhas de montagem automóvel possibilitando uma redução do ciclo de montagem em cerca de 75% do tempo [3].

Do ponto de vista geométrico, a operação de acabamento lida com peças que se encontram já terminadas e como tal necessitam apenas de um processo de acabamento superficial. Deste modo, é necessário um rigor muito elevado nas trajetórias a serem percorridas pela ferramenta e na força exercida pela mesma. O uso de um sensor de força, possibilita ao robô “sentir” obstáculos na trajetória podendo ajustar a sua velocidade e a taxa de remoção de material automaticamente. Assim sendo, não é necessário um esforço tão elevado na programação das trajetórias uma vez que a malha fechada de controlo de força garante o contacto contínuo da ferramenta com a peça.

Tipicamente existem dois tipos de controlo de força: o controlo em malha fechada e o controlo em malha aberta. No primeiro caso, existe um controlo das forças de contacto, possibilitando ao controlador recalcular novas trajetórias e correspondente velocidade em função dessas mesmas forças. Apesar de ser mais dispendioso, o controlo em malha fechada apresenta maior flexibilidade que o controlo em malha aberta, sendo mais adequado para operações de acabamento. No controlo de força em malha aberta, por sua vez, não existe feedback de força para o controlador e portanto a trajetória programada pode não ser cumprida devida às forças de contacto que possam eventualmente surgir. Neste caso impõe-se geralmente um limite máximo à força de contacto. Em termos gerais, o controlo de força em malha aberta apresenta-se como sendo um sistema relativamente simples, barato e com bons tempos de resposta.

Na Figura 1.6 está representado um exemplo de transdutor de força incorporado pela ABB nos seus robôs que é fornecido pela ATI e possibilita o controlo de força em malha fechada.

Figura 1.6 - Transdutor de força ATI F/T Delta IP60 [6]

Com este transdutor é possível medir as 6 componentes da força de contacto resultante de qualquer tipo de operação exercida pelo robô, com baixa histerese e boa repetibilidade.

1.4. Programação de um robô

A programação de um robô envolve a especificação de um conjunto de pontos no espaço que devem ser visitados, sendo definido o tipo de trajetória e velocidade de movimentação entre os pontos especificados e a interação dos movimentos do robô com outros equipamentos.

Tipicamente a programação de um robô requer que o operador movimente de forma assistida ou manualmente o robô até aos diversos pontos de modo a poder definir as trajetórias desejadas. Os diferentes parâmetros que complementam o programa tais como velocidade ou tipo de trajetória são definidos através de uma programação textual. Esta técnica, designada *lead-to-teach* ou simplesmente por programação *online* (Figura 1.7) é, ainda hoje, muito utilizada apesar dos softwares das próprias marcas de robôs terem evoluído no sentido de facilitarem todo este processo de programação. A utilização deste tipo de programação implica que o robô esteja fora da linha de produção e portanto poderá trazer problemas ao nível da produtividade.

Figura 1.7 - Operador a programar manipulador através do método "lead-to-teach" [7]

A programação *off-line* (Figura 1.8) utiliza um tipo de linguagem própria do sistema de simulação e, eventualmente, idêntico à do robô. A utilização da programação *off-line* num robô resulta tipicamente numa diminuição em cerca de 80% do tempo despendido na programação online, permitindo assim aumentar a produtividade [1].

Figura 1.8 - Exemplo de programação *off-line* [8]

A vantagem mais relevante deste tipo de programação é o facto de se poder programar um robô sem que haja necessidade de o retirar da linha de produção. Contudo existem diversos problemas associados a este tipo de programação tais como eventuais erros de tradução ou interpretação da linguagem do software de simulação, erros nos sistemas de interpolação de movimentos e erros associados à ausência da modelização dinâmica do robô. Existe ainda a necessidade de um pós-processamento eficiente e a utilização de algoritmos de calibração que permitam de uma forma simples a calibração do robô e da célula de trabalho real.

Os softwares de programação de robôs têm evoluído no sentido de se tornarem cada vez mais eficazes e cada vez mais agradáveis para o utilizador, não requerendo ao operador conhecimentos profundos em programação.

1.5. Produção de guitarras

Inventada em 1931 por George Beauchamp (Figura 1.9), a guitarra elétrica desde cedo começou a ser um dos instrumentos mais importantes na música rock e pop.

Figura 1.9 - Primeira guitarra elétrica produzida, inventada por George Beauchamp em 1931 [9]

Tipicamente o material mais utilizado na produção de guitarras continua a ser a madeira. No entanto, para além de eventuais defeitos de fabrico, é frágil e muito suscetível às condições ambientais, nomeadamente à temperatura e humidade. Como tal, desde cedo se tornou importante encontrar soluções para este problema. Com os processos de maquinagem disponíveis, as empresas de produção de guitarras começaram a apostar no alumínio (Figura 1.11 a)), tornando-se então num dos materiais alternativos mais populares para a produção de guitarras. Apesar do processo manual no fabrico de guitarras ser, ainda hoje, um método bastante utilizado, foi nesta altura que se começaram a introduzir os sistemas CAD/CAM na produção de guitarras (Figura 1.10 a)). Estes sistemas permitiram o aumento da produtividade sem perda de qualidade ou precisão no corte, no entanto, o acabamento final continua, ainda hoje, a ser praticamente feito manualmente (Figura 1.10 b)).

Figura 1.10 - Processo de produção de guitarras: a) automatizado [10]; b) manual [11]

Mais tarde surgiu a fibra de carbono (Figura 1.11 b)) como material alternativo à madeira. A primeira solução feita com este material surgiu por volta de 1970, mas ainda hoje é uma área em grande desenvolvimento, para que se consigam criar guitarras que combinem a elevada resistência com o baixo peso sem afetar a qualidade acústica do produto final.

Figura 1.11 - Exemplo de guitarra: a) feita em alumínio [12]; b) feita em fibra de carbono [13]

Fundada em 2008, a Ideia.m é a empresa responsável pela criação da AVA (Figura 1.12), uma guitarra feita em fibra de carbono com metade do peso de uma guitarra tradicional e insensível à temperatura e humidade.

Figura 1.12 - AVA Guitar, guitarra em fibra de carbono produzida pela Idea.m [14]

Incubada no Parque de Ciência e Tecnologia da Universidade do Porto (UPTEC), a Ideia.m prevê arrancar com uma produção anual de 100 a 200 guitarras elétricas e, numa segunda fase, atingir uma produção anual de 2000 exemplares, com um preço base a rondar os 3000 euros, e que terá Inglaterra e os EUA como principais mercados [15]. A Ideia.m também desenvolve produtos em materiais compósitos para a indústria de mobiliário, automóvel e aeronáutica, uma atividade que permite sustentar o projeto dos instrumentos musicais.

Como curiosidade, a primeira guitarra produzida pela Ideia.m foi oferecida pela Universidade do Porto ao Papa Bento XVI na sua visita à cidade, sendo o único proprietário de um modelo AVA, representando "um exemplo da inovação da universidade".

1.5.1. Guitarras feitas em materiais compósitos

Os termos "fibra de carbono" ou "fibra de vidro", que são maioritariamente utilizados na indústria aeronáutica e aeroespacial, não são os mais adequados, uma vez que a fibra é apenas um dos constituintes da estrutura do material. O outro constituinte desse material é a resina que é colocada sobre a fibra e que, após um tratamento térmico correto, resulta na combinação desses dois constituintes sob a forma de um laminado com excelentes propriedades mecânicas e físicas, sendo normalmente insensível às condições ambientais. Um termo que se pode utilizar mais corretamente é CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Plastic*.

O material compósito é então constituído por pelo menos dois elementos funcionando em conjunto, para produzir um material que tem propriedades diferentes desses mesmos elementos quando considerados individualmente. Os materiais compósitos mais comuns são os de matriz polimérica, sendo constituídos por um polímero (tendo a resina como matriz) reforçado com fibras, como vidro, carbono ou aramida [16].

Atualmente existem vários processos de fabrico de materiais compósitos tais como: *spray lay-up*, processo manual, fabrico em vácuo, enrolamento filamentar, pultrusão, RTM (*Resin Transfer Moulding*) ou infusão. Estes processos, tal como as propriedades individuais dos constituintes utilizados, têm uma influência direta nas propriedades finais de um compósito.

No caso particular dos materiais utilizados pela Ideia.m no fabrico de guitarras, o processo utilizado é o processo manual. Neste método a resina é colocada e impregnada nas fibras à mão com o auxílio de um rolo ou pincel como se pode verificar na Figura 1.13. Após esta fase, o produto pode ser deixado a curar às condições atmosféricas ou recorrendo a um ambiente de vácuo. Neste último, o produto é envolvido por uma saco e todo o ar existente dentro deste é extraído através de uma bomba de vácuo, criando no seu interior uma atmosfera de pressão que provoca a consolidação de toda a estrutura. Este processo é um dos mais utilizados na indústria e também um dos mais antigos, uma vez que é de fácil aprendizagem e execução; contudo tem como desvantagem o facto da qualidade final do produto estar muito dependente da habilidade do laminador.
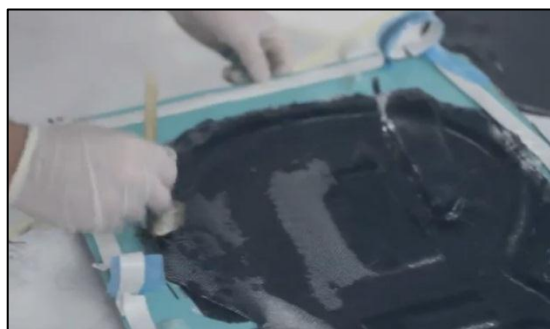
Figura 1.13 - Processo manual de fabrico da guitarra em fibra de carbono [14]

Após este processo, resultam duas peças sólidas que após colagem formam o corpo da guitarra. Antes deste processo de colagem é necessário uma operação de acabamento para remover todo o material em excesso na aresta das peças, resultante da operação de moldagem. Este processo designa-se habitualmente por *trimming*.

1.6. Objetivos e estrutura da dissertação

A evolução tecnológica, mais concretamente a introdução dos robôs industriais em operações de acabamento e o processo de produção de guitarras em materiais compósitos, têm uma grande importância para a definição dos objetivos desta dissertação.

1.6.1. Objetivo principal da dissertação

O principal objetivo desta dissertação é a conceção e simulação de uma célula robótica dedicada a operações de *trimming* de guitarras feitas em materiais compósitos. A avaliação experimental deverá ser feita utilizando a célula robótica disponível no laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Para o efeito, deverão ser estudadas diferentes soluções recorrendo ao software de programação *RobotStudio*. Pretende-se comparar os resultados obtidos nas diferentes estratégias de controlo do robô (controlo de força em malha fechada e controlo de velocidade e posição), e avaliar tanto a solução como o software quanto à sua aplicabilidade neste tipo de operações.

Esta dissertação é realizada em parceria com a empresa Ideia.m especializada na conceção e fabrico de instrumentos musicais em materiais compósitos, disponibilizando as peças e uma base de suporte para realização dos diferentes ensaios.

1.6.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, seguidos das Referências utilizadas.

Assim, após este primeiro capítulo, onde é feita uma apresentação e contextualização de todo o tema e apresentadas algumas soluções existentes na indústria, segue-se um segundo capítulo, denominado ***Arquitetura de uma célula robótica dedicada a operações de acabamento e software de programação***, onde se apresenta a caracterização geral do *layout* típico de uma célula robótica dedicada a operações de acabamento e se estabelece a ligação

com os recursos utilizados para a realização deste projeto. É ainda feita uma apresentação das características e potencialidades do software utilizado.

No terceiro capítulo, designado ***Programação Off-Line e Simulação de uma célula robótica dedicada a operações de acabamento*** é feita uma descrição detalhada de todos os procedimentos utilizados na programação *off-line* e simulação da solução gerada.

No quarto capítulo, intitulado ***Implementação da Solução Desenvolvida***, descreve-se a integração funcional de todos os componentes utilizados na célula robótica. Todos os procedimentos efetuados para testar e validar a solução proposta são detalhadamente abordados e comentados, bem como todos os ensaios realizados e respetivos resultados.

No quinto e último capítulo são apresentadas as ***Conclusões*** finais de todo o trabalho desenvolvido e sugeridos ***Trabalhos futuros*** que poderão de certa forma dar continuidade a esta dissertação.

2. Arquitetura de uma célula robótica dedicada a operações de acabamento e software de programação

Neste capítulo são estudadas soluções para a conceção da célula robotizada que melhor satisfaçam os requisitos impostos e atendam aos recursos disponibilizados. É feita ainda uma abordagem das características gerais ao software utilizado.

2.1. *Layout d*e uma célula robotizada

Tipicamente o conceito de célula robotizada subentende a presença de vários elementos. Esses elementos geralmente compreendem a existência de um robô e respetivo controlador, uma ferramenta transportada pelo robô (ou fixa), um sistema de posicionamento, eventualmente um sistema de alimentação/remoção dos produtos e mecanismos de segurança. A célula robotizada que se pretende implementar nesta dissertação compreende apenas os sistemas básicos: o robô e respetivo controlador, ferramenta e sistema de posicionamento.

De um modo geral, uma célula robótica pode apresentar dois tipos de configuração: robô centrado na célula (Figura 2.1) ou robô em linha com o sistema de transporte. No primeiro caso, o robô encontra-se posicionado no centro da célula com os restantes equipamentos dispostos em seu redor. No caso de o robô estar em linha com o sistema de transporte (Figura 2.2), como o próprio nome indica, o robô está disposto de forma alinhada com os sistemas de transferência de produtos.

Figura 2.1 - *Layout* típico de célula robótica com robô centrado [17]

Figura 2.2 - *Layout* típico de célula robótica com robô em linha [18]

2.2. Recursos utilizados

Robô

Para a realização desta dissertação utilizou-se o robô da ABB modelo IRB 2400/16 (Figura 2.3), disponível no laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com o respetivo controlador IRC5. Este robô possui uma configuração em série e é um dos mais populares na sua classe. Neste caso em particular, possui uma montagem fixa ao solo apoiado num pedestal. As suas características principais estão indicadas na Tabela 2.

Figura 2.3 - Robô ABB IRB2400/16 [19]

Tabela 2 - Características do robô ABB IRB 2400/16 [19]

Graus de liberdade	6
Capacidade de Carga	20 Kg
Repetibilidade de posicionamento	0,07 mm
Repetibilidade de trajetória	0,15 mm
Alcance máximo	1,5 m

Mesa posicionadora

Associada ao robô, encontra-se uma mesa posicionadora da ABB modelo IRBP C 500, com uma capacidade de carga de 500 Kg e um eixo de rotação (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Mesa posicionadora ABB IRB C 500 [20]

Suporte da peça

Sendo a peça a trabalhar de grandes dimensões e de geometria complexa optou-se por fixar a peça na mesa posicionadora com a ajuda de um suporte e acoplar a ferramenta ao braço do robô.

Inicialmente discutiu-se a criação de um suporte idêntico ao próprio molde da peça, para que esta fosse devidamente apoiada ao longo de toda a superfície de forma a evitar eventuais oscilações e erros de posicionamento durante a operação de corte. Contudo, este suporte foi disponibilizado apenas numa fase final da dissertação e como tal não foi possível explorar devidamente as suas potencialidades.

Utilizou-se então um suporte mais simples feito em madeira, de formato paralelepipédico, onde se fixou a peça por meio de parafusos.

Ferramenta

Como a ferramenta atualmente utilizada no processo manual de *trimming* das guitarras produzidas pela Ideia.m é um berbequim elétrico de elevada capacidade de rotação, optou-se por utilizar o mesmo tipo de ferramenta tendo em conta os recursos disponíveis e por ser uma solução economicamente viável. Para isso foi necessário conceber uma interface que permitisse ligar a ferramenta ao elemento terminal do robô tendo como principal preocupação minimizar a distância do *tool center point* à flange do robô de forma a maximizar a resistência

à torção e à flexão. Esta interface foi posteriormente modelada em formato digital (*SolidWorks*) de modo a permitir a sua exportação para o software de simulação/programação. Na Figura 2.5 e Figura 2.6 é possível verificar a modelação final desta interface e a sua montagem final, respetivamente.
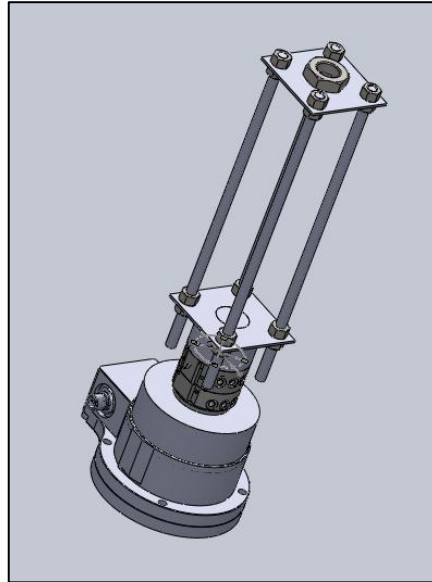
Figura 2.5 - Modelação em *SolidWorks* da interface criada para a ferramenta com transdutor de força incluído
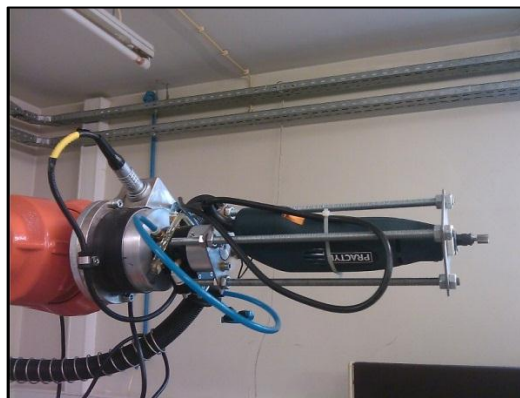
Figura 2.6 – Interface acoplada ao manipulador e com a ferramenta utilizada

Na Figura 2.7, pode-se observar a ferramenta de corte que se utilizou. Esta é caracterizada por apresentar um revestimento diamantado, aumentando assim a sua dureza e resistência à abrasão. Ao contrário de uma fresa convencional, onde o corte é provocado por arranque de apara, neste tipo de fresa a remoção de material é feita por desgaste do material, aumentando assim a qualidade final do acabamento.

Figura 2.7 - Ferramenta de corte utilizada na solução

2.3. Processo de Calibração

Uma das principais dificuldades que se encontram ao trabalhar com células robóticas virtuais é precisamente a sua validação, isto é, replicar a posição e características de todos os componentes da célula virtual na célula real. Este procedimento designa-se de calibração e pode ser dividido em vários tipos.

Atualmente existem já várias soluções criadas pelos próprios fabricantes de robôs que facilitam este processo, seja através de software especializado ou mecanismos dedicados exclusivamente a este procedimento.

Calibração do Robô

Neste procedimento é ensinado ao robô o seu zero absoluto, isto é, através da consola de programação movimenta-se manualmente o robô até ao valor zero de cada junta, melhorando desta forma a precisão do posicionamento absoluto do robô. Tendo em conta que o robô utiliza codificadores incrementais, este tipo de calibração é particularmente útil quando há uma perda de energia nas baterias o que corresponde a uma perda do zero de referência.

Um exemplo deste tipo de calibração utilizado pela ABB na calibração dos seus robôs antes de serem disponibilizados ao cliente é o chamado método *ABB's Absoulte Accuracy* que basicamente elimina quaisquer diferenças entre a precisão do robô virtual e o robô da célula real. Este método consiste em ensinar ao robô 100 posições diferentes e através do sistema *Leica Laser Tracker* (Figura 2.8) da ABB que identifica e compara essas mesmas posições, é feita a compensação necessária para a correção do posicionamento de modo a assegurar a máxima precisão dos robôs.

Figura 2.8 - Calibração de um robô ABB utilizando o sistema *Leica Laser Tracker* [21]

Calibração da ferramenta e do *Tool Center Point* (TCP)

Neste caso é ensinado ao robô as características da ferramenta (peso, centro de gravidade e momento de inércia) e a posição do *tool center point*, isto é, a posição da ponta da ferramenta em relação ao último eixo do robô. Estas características são fundamentais para um bom funcionamento do robô para posicionar corretamente a extremidade da ferramenta. No caso do robô utilizado, a definição da posição do TCP, a determinação do próprio peso e centro de gravidade da ferramenta é feita recorrendo às funcionalidades disponíveis no controlador do robô, e ao facto de o robô possuir um sensor de força incorporado.

Calibração do layout/peça a trabalhar

Neste tipo de calibração é feita uma correção da posição relativa entre os diferentes componentes utilizados na célula real e na célula virtual para que coincidam no seu posicionamento. Um exemplo bastante atual deste tipo de calibração é o sistema *MotoSight* desenvolvido pela Motoman (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Sistema MotoSight desenvolvido pela Motoman [22]

O *MotoSight* pode ser integrado num robô e que ao incorporar um sistema de visão e uma unidade de processamento é capaz de localizar e identificar uma dada peça, corrigir erros de posicionamento, fazer uma inspeção à própria peça, entre outros.

2.4. Software de programação utilizado

A programação *off-line* do robô IRB 2400 da ABB é realizada utilizando o software fornecido pelo próprio fabricante do robô: o *RobotStudio* (v5.14.02).

Este software permite a criação e programação de ambientes virtuais (Figura 2.10) de maneira a que sejam o mais semelhantes possível às células robóticas reais disponíveis. Para tal, disponibiliza bibliotecas com modelos à escala real de diversos produtos, tais como robôs, mesas posicionadores, ferramentas, *conveyors*, etc.

Este software é compatível com vários formatos de ficheiros CAD, o que possibilita a importação de peças previamente modeladas para o ambiente virtual da célula robótica.
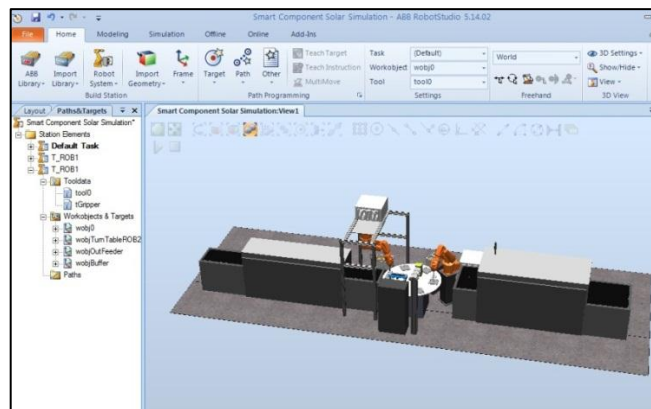
Figura 2.10 - Exemplo de um ambiente virtual do *RobotStudio* da ABB

Uma outra grande vantagem da utilização do *RobotStudio* é o facto de incorporar modelos virtuais dos controladores, permitindo ao software realizar a verificação de aplicabilidade do programa gerado numa célula real em ambiente virtual. Para tal, o controlador virtual realiza cálculos de cinemática inversa, verificando desde logo se é possível replicar a simulação na célula real. Outra particularidade do *RobotStudio* é o facto deste incorporar um modelo, também virtual, da consola de programação do robô permitindo assim ao utilizador programar e simular num modo off-line bastante realista (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Consola de programação: a) real; b) virtual

A transferência do programa criado para o controlador real pode ser feita através de uma ligação Ethernet previamente estabelecida ou através de ligação USB com um dispositivo de armazenamento. O próprio software converte automaticamente as instruções contidas na simulação para um programa na linguagem própria do controlador. A linguagem *RAPID* é a que é utilizada pela ABB para a programação dos seus robôs.

Tendo em conta que o *RobotStudio* tem um grafismo bastante agradável, é possível a verificação do alcance do robô e escolher a melhor configuração para uma dada operação. Além disso tem uma funcionalidade bastante útil que é a deteção de possíveis colisões entre os diferentes elementos da célula robótica. Aliando todas estas vantagens ao facto de, como já foi referido, incluir o controlador virtual, tornando possível a verificação da aplicabilidade do programa na célula real, o *RobotStudio* apresenta-se como uma ferramenta bastante poderosa na programação e simulação de robôs da ABB.

2.4.1. Extensão *Machining Power Pack*

Para a realização desta dissertação instalou-se uma aplicação do *RobotStudio* dedicada a operações de maquinagem e acabamento, o *Machining Power Pack*.

Com este *add-in*, todo o processo de geração de trajetórias é facilitado, ou seja, enquanto na versão base do *RobotStudio* é necessário marcar vários pontos ao longo de uma superfície a trabalhar para gerar as trajetórias, com o *Machining Power Pack* seleciona-se a superfície a trabalhar e, posteriormente, são automaticamente identificadas as trajetórias que podem ser geradas nessa superfície, incluindo em cada uma todos os pontos necessários.

Com esta extensão também é possível gerar as diferentes trajetórias nos diferentes modos de controlo: controlo em posição e velocidade (*NormalProcess*) e controlo ativo de força. Neste último, existem dois modos distintos: o *FC_PressureProcess* e o *FC_SpeedChangeProcess*. No primeiro caso, são definidas três forças de referência, correspondendo cada uma a cada um dos eixos cartesianos, e o controlador atua sobre a trajetória programada, alterando-a de maneira a manter essas forças constantes. Para tal a trajetória programada pode eventualmente não ser cumprida, o que na aplicação estudada não é de todo desejável. No caso do *FC_SpeedChangeProcess*, é definida uma força de referência e ao longo da trajetória o controlador altera a velocidade de avanço do robô, dentro de um determinado limite, em função da força registada tendo em conta esse valor de referência. Ou seja, quando a força ultrapassa esse valor de referência, a velocidade do robô diminui, se por outro lado a força registada pelo sensor for inferior à referência, a velocidade de avanço aumenta. Tanto a referência da força, como os valores das velocidades ou mesmo a aceleração/desaceleração que o robô tem ao mudar de velocidade, podem ser programados. No caso da velocidade do robô se encontrar no valor mínimo e a força continuar a aumentar, é possível criar uma rotina no programa que define o que o robô irá fazer quando tais condições se verificam (designado *Safety Level*). Na Figura 2.12 pode-se observar o funcionamento de todo este processo. Este modo de funcionamento tem como base de controlo um esquema lógico dividido em várias etapas e condições.
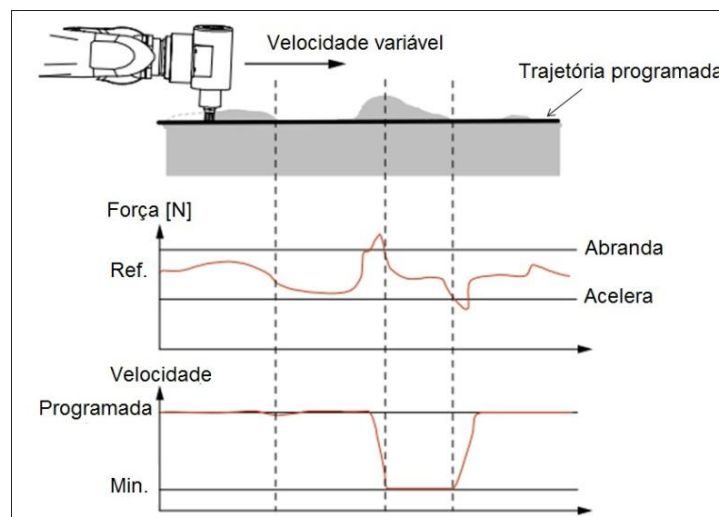
Figura 2.12 - Esquema de funcionamento do robô no modo *FC SpeedChange* [22]

No exemplo indicado, a velocidade varia entre dois patamares, no entanto é possível definir-se até dez níveis de velocidade. Na Figura 2.13, pode-se verificar a janela que contém todos os parâmetros programáveis no modo *FC_SpeedChangeProcess*.
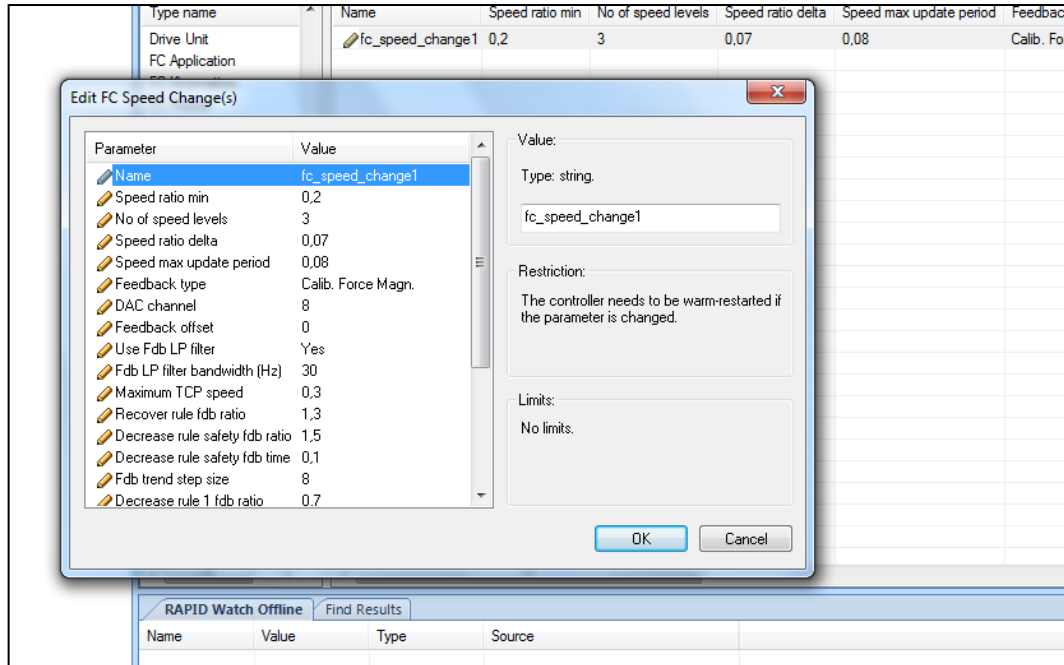
Figura 2.13 - Parâmetros programáveis no modo *FC SpeedChange*

Calibração do *layout*

Com a utilização do *RobotStudio* em conjunto com a extensão do *Machining Power Pack*, é possível criar uma rotina de calibração entre a célula virtual e a célula real. Esta rotina é lida antes de qualquer programa e requer a criação de cinco pontos na célula virtual e atua sobre a posição do *workobject* (referencial de trabalho) selecionado (Figura 2.14).
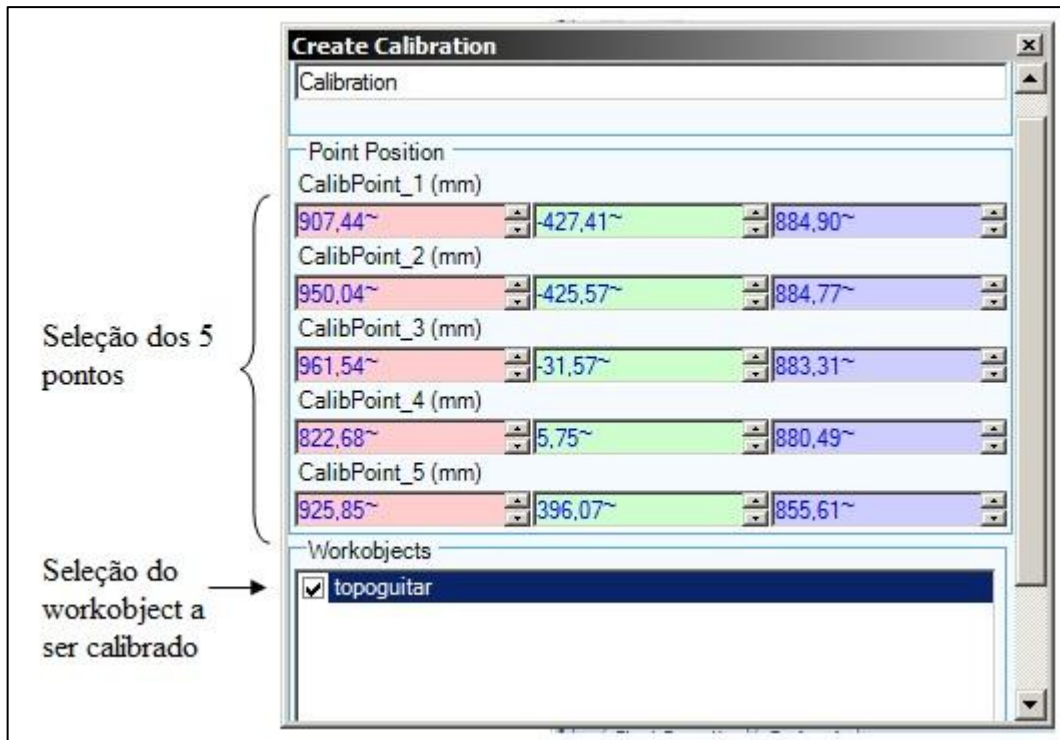
Figura 2.14 – Janela de criação dos *targets* de calibração

Após ter sido criada esta rotina de calibração é feita a exportação para o controlador real e é gerado automaticamente o programa *RAPID* correspondente a este processo. Antes de executar a rotina de calibração deverão ser criados os mesmos cinco *targets* utilizados na célula virtual mas desta feita em relação à célula real. Ao correr a rotina, o que o controlador faz é comparar os valores dos *targets* criados em ambiente virtual com os criados na célula real e ajustar diretamente a posição do referencial de trabalho utilizado na programação das trajetórias, concluindo assim o processo de calibração.

2.4.2. Software leitor de sinal *Teste Signal Viewer*

Uma vez que se pretende analisar as forças de contacto envolvidas em todo o processo de *trimming* optou-se por instalar um software, também fornecido pela ABB, que estando devidamente ligado com o controlador do robô, faz o condicionamento de sinal proveniente do sensor de força e apresenta o resultado num gráfico em tempo real. O eixo dos yy representa a força, em Newton, enquanto o eixo dos xx representa o tempo em segundos. A cada eixo do referencial do robô está associado uma saída diferente e portanto é possível obter as três componentes da força apresentadas de forma distinta. De referir que para cada sinal, pode-se definir um determinado *offset* ou mesmo aplicar um filtro passa-baixo para efeitos de

calibração e filtragem de ruído, respetivamente. Na Figura 2.15, pode-se observar um exemplo de um gráfico obtido através da leitura de sinal com este software.
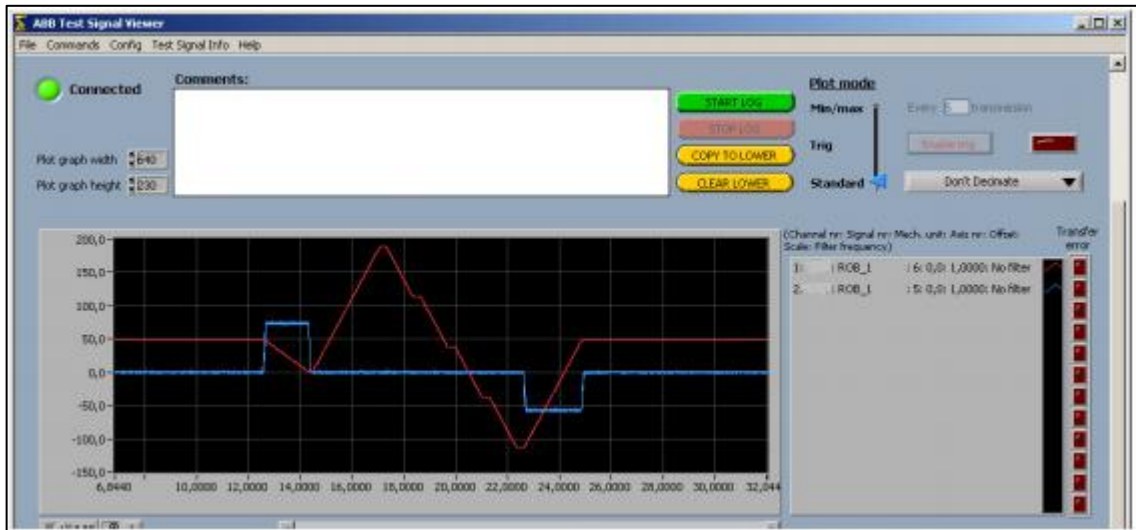
Figura 2.15 - Aspeto gráfico do sofware *Teste Signal Viewer*

Em suma, a realização desta dissertação implicou a instalação de várias ferramentas informáticas que possibilitaram a utilização de todos os recursos necessários:

- RobotWare 5.12.3023 (Software do controlador real)
- RobotStudio 5.14.02 (Software de programação off-line)
- RobotWare Machining FC GUI (Software que permite a programação em controlo ativo de força)
- Machining Power Pack 5.14.02 (Extensão de software do RobotStudio dedicado a operações de acabamento)
- ABB Test Signal Viewer

3. Programação *Off-Line* e Simulação de uma célula robótica dedicada a operações de acabamento

Neste capítulo são abordados todos os procedimentos e considerações utilizadas na programação *off-line* do robô. Inicialmente é feita uma descrição detalhada da criação da célula virtual, e posteriormente são explicados todos os passos de programação e simulação.

3.1. *Layout* da célula robotizada e criação do controlador virtual

Um dos primeiros passos antes da programação e simulação é a criação do *layout* da célula robótica a ser utilizada e a definição do controlador virtual. Para tal, teve-se como base o *layout* da célula real disponível no Laboratório de Robótica, sendo inseridos os diferentes componentes a partir da biblioteca de modelos disponibilizada pelo próprio software (Figura 3.1).
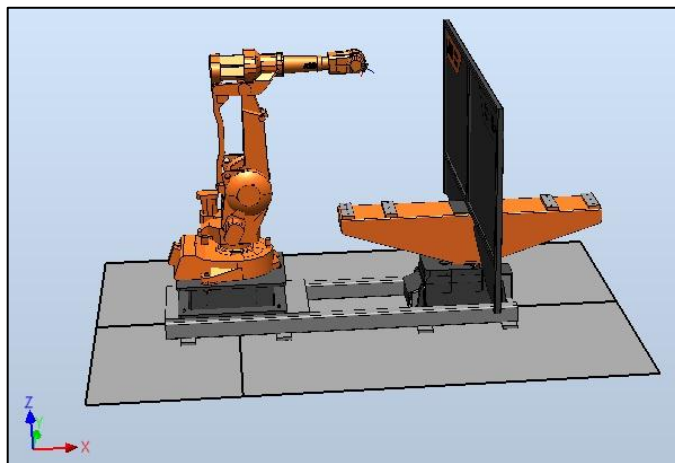
Figura 3.1 - *Layout* da célula virtual criada no *RobotStudio*

Além de diferentes componentes, o software dispõe também de uma biblioteca de controladores baseados em *layouts* pré-definidos. No entanto o controlador pode ser obtido tendo por base o *layout* criado pelo utilizador. Deste modo, é possível ainda configurar alguns parâmetros e funcionalidades do controlador consoante os requisitos da solução a desenvolver. Para esta dissertação foram definidos os parâmetros que possibilitaram o recurso ao controlo de força do robô (Figura 3.2).
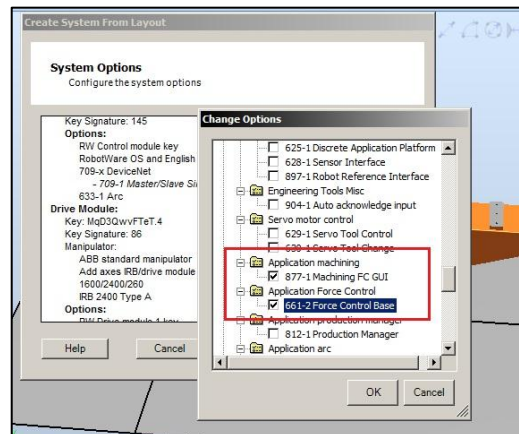
Figura 3.2 - Definição dos parâmetros de controlo de força para o controlador virtual

Uma das características do *RobotStudio* é a possibilidade da modelação de geometrias. No entanto, como já foi referido no capítulo anterior, também possibilita a importação de ficheiros CAD em vários formatos. Esta particularidade torna-se bastante útil caso se pretendam trabalhar peças de geometria complexa. Todas as geometrias utilizadas foram modeladas em *SolidWorks* numa primeira fase e posteriormente exportadas para o *RobotStudio*. Contudo, devido ao facto do desenho 3D fornecido conter um elevado número de *features* geradas no *SolidWorks*, a exportação para o *RobotStudio*, apesar da existência de vários formatos compatíveis, teve de ser realizada no formato *".step"* uma vez que foi o único que resultou numa exportação de todas as características da peça (superfícies e arestas).

Na Figura 3.3 é possível observar a interface de suporte da ferramenta criada, acoplada ao braço do robô.
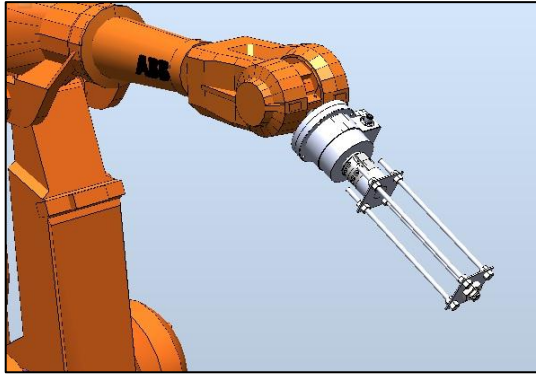
Figura 3.3 - Interface da ferramenta acoplada ao robô em ambiente virtual

3.2. Definição de sistemas de coordenadas de referência

A estrutura de programação do *RobotStudio* tem como base a definição de sistemas de coordenadas para localizar no espaço determinados objetos garantindo-se assim o posicionamento relativo dos diferentes elementos da célula. Estes sistemas de coordenadas têm uma estrutura hierárquica, ou seja, a origem de cada referencial é definida em relação a outro referencial antecessor. Foram criados vários sistemas de coordenadas, entre eles destaca-se aquele que foi associado à peça a ser trabalhada e outro correspondente à ponta da ferramenta. Estes, por sua vez, estão definidos em relação ao referencial da base do robô.

O referencial da ferramenta (*tool frame*) corresponde à posição e orientação da ponta da ferramenta. O próprio software possibilita a criação de uma ferramenta recorrendo a geometrias previamente importadas e um referencial correspondente ao *Tool Center Point* (TCP). Tendo em conta que se fez a importação da ferramenta previamente modelada, este aspeto tronou-se bastante útil. Para tal, inicialmente efetuou-se o procedimento de definição do *tool center point* na consola da célula real já com a ferramenta instalada. Este procedimento consiste em movimentar o robô quatro vezes até um ponto, sempre com orientações diferentes da ferramenta, mas mantendo sempre a ponta desta posicionada nesse mesmo ponto (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Procedimento automático para cálculo do *Tool Center Point*

Após definir estas quatro orientações, o próprio controlador calcula o valor do *tool center point*, sempre em relação ao referencial *tool0*. Na Figura 3.5 pode observar-se o TCP criado em ambiente virtual.

De notar que para todas as trajetórias e simulações geradas, este referencial é fundamental uma vez que indica onde a extremidade da ferramenta da célula real se vai posicionar.
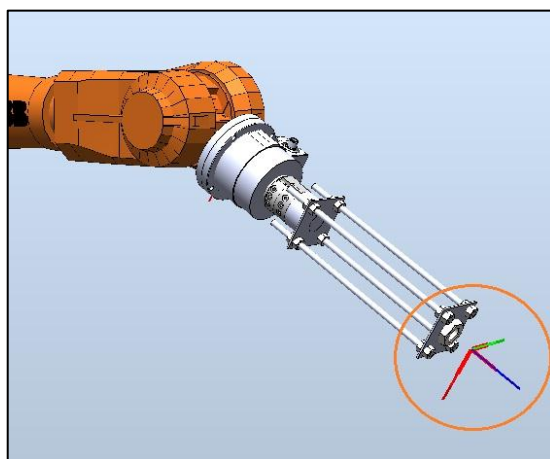
Figura 3.5 - *Tool Center Point* criado na ferramenta utilizada

Após ter-se definido o valor do *tool center point*, efetuou-se outro procedimento automático, que permitiu obter o peso de toda a interface e ferramenta bem como o seu centro

de gravidade, recorrendo ao sensor de força do robô. Na Tabela 3, apresentam-se os resultados obtidos nos procedimentos descritos anteriormente.

Tabela 3 - Características da interface utilizada com ferramenta incluída

Massa	2 Kg		
	xx	**yy**	**zz**
***Tool Center Point* [mm]**	0	0	415
Centro de gravidade [mm]	-70	89	114

O referencial de trabalho (*workobject*) representa a localização de um dado objeto na célula e é particularmente útil uma vez que na programação do robô, os pontos das trajetórias geradas ficam definidos em relação a este sistema de coordenadas.

Dentro da mesma estação podem ser criados vários *workobjects* e associar mais do que um ao mesmo objeto. Assim, a cada trajetória está associado um *workobject* facilitando deste modo não só a programação em ambiente virtual nomeadamente as posições relativas entre pontos e objetos, mas também a calibração da célula real. Isto é, quando o programa é copiado para o controlador real, basta indicar ao robô a posição correspondente à do *workobject* e correr o programa desejado.

3.3. Programação e geração de trajetórias

Em robótica, designa-se trajetória ou *path* a um percurso a ser realizado pelo robô e é constituído por um conjunto de instruções de movimento entre diferentes pontos (*targets*). Essas instruções de movimento definem o tipo de movimento, velocidade entre *targets*, precisão (*zone*), ferramenta utilizada e referencial de trabalho (*workobject*).

Como já foi referido, a trajetória que se pretende percorrer é o contorno exterior das duas peças constituintes das guitarras. Na Figura 3.6 é possível observar um exemplo de uma trajetória gerada numa das peças.
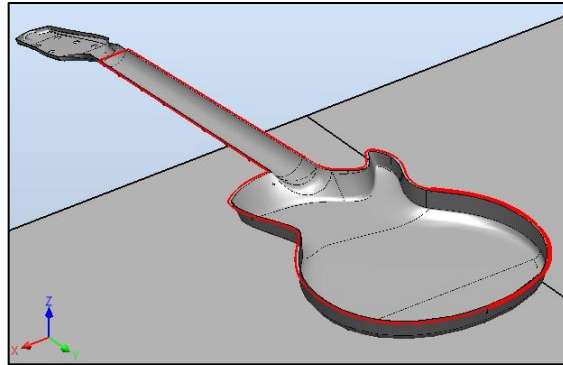
Figura 3.6 - Exemplo de trajetória gerada na peça inferior da guitarra

De referir que neste processo de simulação virtual, tanto a base como a ferramenta têm um comportamento perfeitamente rígido, uma vez que nesta fase apenas se pretende avaliar a exequibilidade do processo em termos cinemáticos e, mais tarde, utilizar e modificar o código de programação na linguagem *RAPID* que resulta da sincronização com o controlador virtual.

Tendo em conta que é possível adaptar o *Machining Power Pack* à programação e simulação do processo de rebarbagem em causa, pode-se usufruir da metodologia própria do software para gerar as diferentes trajetórias desejadas. A sua utilização torna o processo de geração de trajetórias para maquinagem mais expedito e insensível a erros de configuração. De modo a facilitar a sua compreensão, serão seguidamente apresentadas algumas etapas e particularidades da programação de trajetórias recorrendo precisamente ao *Machining Power Pack*.

Através da execução do assistente de soluções "*solution wizard*", a configuração da solução é alcançada, sendo para isso necessário definir determinados parâmetros ao longo de várias etapas.

1) Definição da solução

Nesta primeira fase, é escolhida a tarefa a ser executada e o controlador do robô que vai executar a operação. É ainda definido um nome para o processo (Figura 3.7)
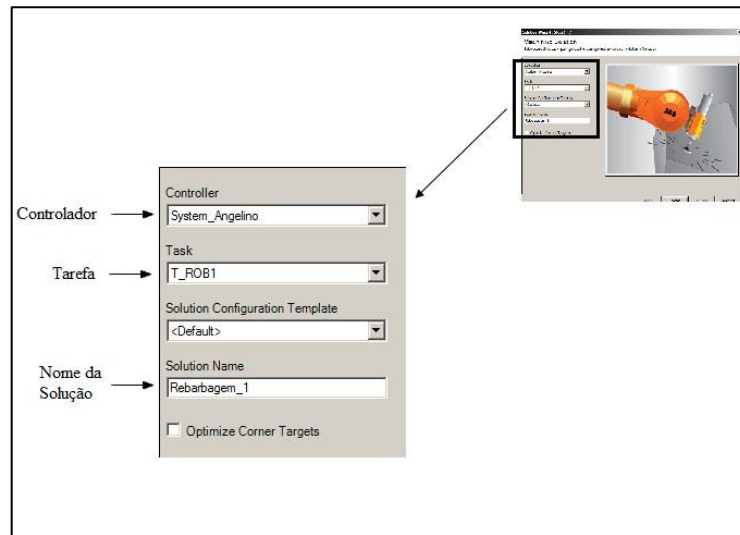
Figura 3.7 - Definição da solução

2) Identificação da superfície a ser trabalhada

Nesta fase são selecionadas as superfícies a serem maquinadas, tendo em conta as arestas que vão ser posteriormente indicadas como referência (Figura 3.8).
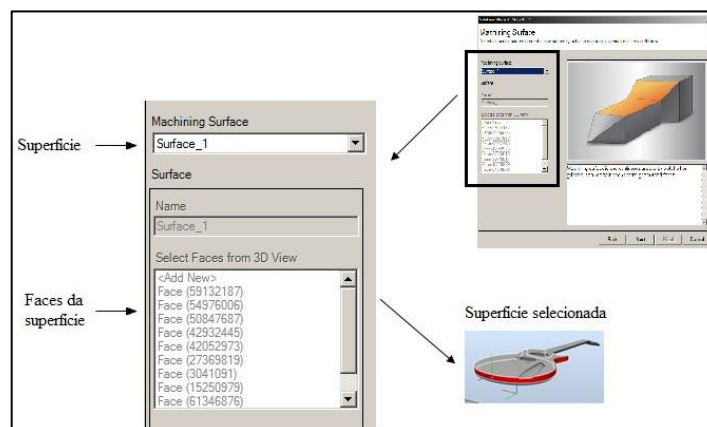
Figura 3.8 - Definição da superfície a ser trabalhada

3) Definição dos parâmetros de maquinagem

Neste terceiro passo (Figura 3.9), definem-se alguns parâmetros do processo de maquinagem, tais como tolerância máxima, ângulo de desvio da trajetória, modo de controlo do processo (controlo de velocidade e posição ou controlo ativo de força) e finalmente existe ainda a possibilidade de otimização de velocidade na superfície da peça, isto é, definir qual a velocidade de avanço máxima e mínima do robô ao longo de todo o processo.
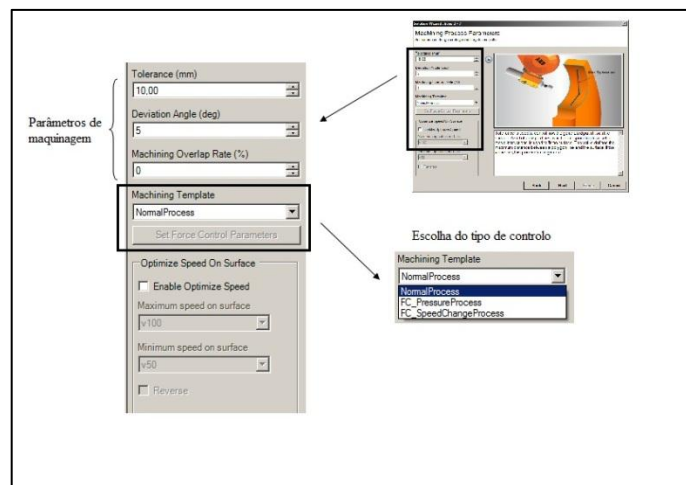
Figura 3.9 - Definição de parâmetros de maquinagem

4) Escolha da ferramenta e do referencial de trabalho

Nesta fase (Figura 3.10) escolhe-se o referencial de trabalho ao qual se pretende associar os pontos da trajetória que irão ser criados e qual a ferramenta a utilizar no processo. Pode ainda ser definida a posição da ferramenta no corte (lateral ou topo) e alguns parâmetros característicos desta para que seja automaticamente criada a sua compensação.
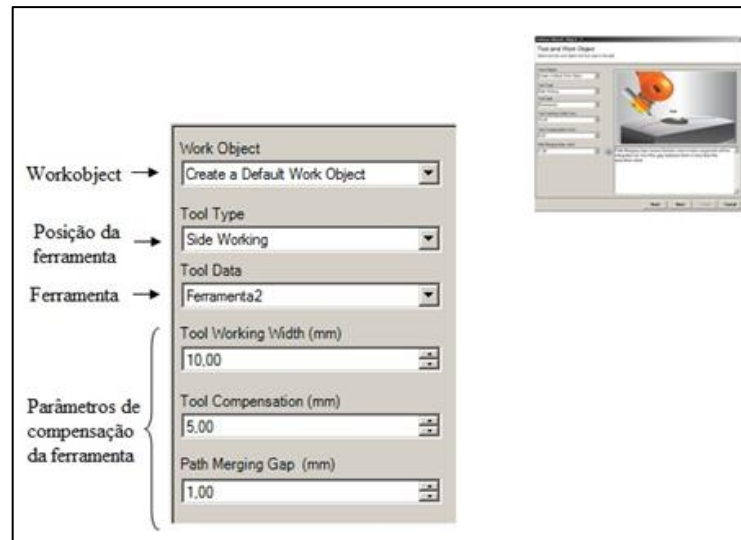
Figura 3.10 - Escolha da ferramenta e do referencial de trabalho

5) Seleção das arestas

É neste passo que se escolhe o modo de geração das trajetórias. Neste caso em particular estas foram geradas com base nas arestas da peça. Assim, ao escolher o modo "*edges*", selecionam-se todas as arestas que se pretendem incorporar na trajetória posteriormente gerada (Figura 3.11). De notar que, caso as arestas pretendidas não estejam contidas na superfície previamente selecionada no passo 2, não serão incorporadas na trajetória.
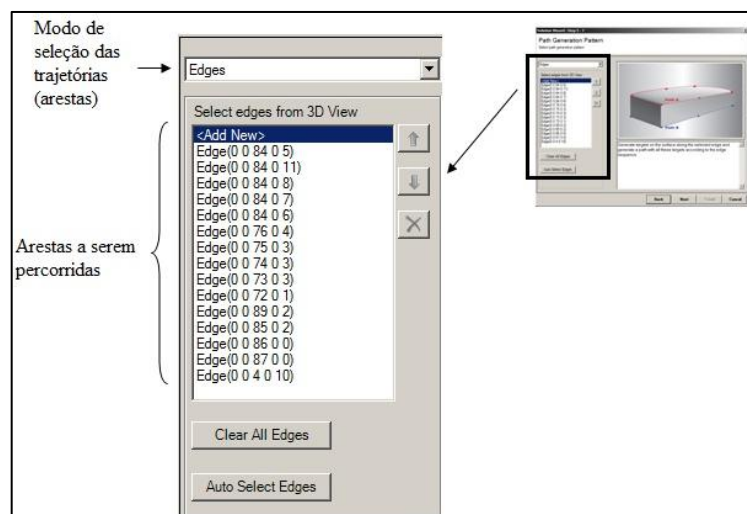
Figura 3.11 - Definição do modo de geração de trajetórias

6) Definição da orientação dos *targets*

Após a indicação da trajetória pretendida, nesta secção definem-se as orientações dos *targets* constituintes da trajetória, o ângulo de trabalho da ferramenta, o *offset* da trajetória em relação à aresta e alguns parâmetros da trajetória de aproximação/afastamento à área de trabalho (Figura 3.12).
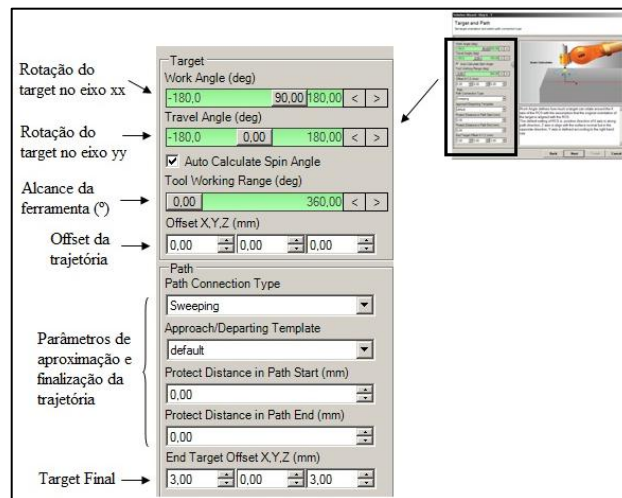
Figura 3.12 - Definição da orientação dos *targets* da trajetória

No final deste processo é apresentada uma pré-visualização da trajetória a ser gerada, onde é possível atribuir uma configuração automática ao manipulador bem como proceder à sincronização com o controlador virtual.

Na Figura 3.13 pode-se observar um exemplo de uma trajetória gerada e correspondente orientação dos *targets* constituintes. Cada *target* é definido por um referencial com o eixo xx a vermelho, o eixo yy a verde e o eixo zz a azul.
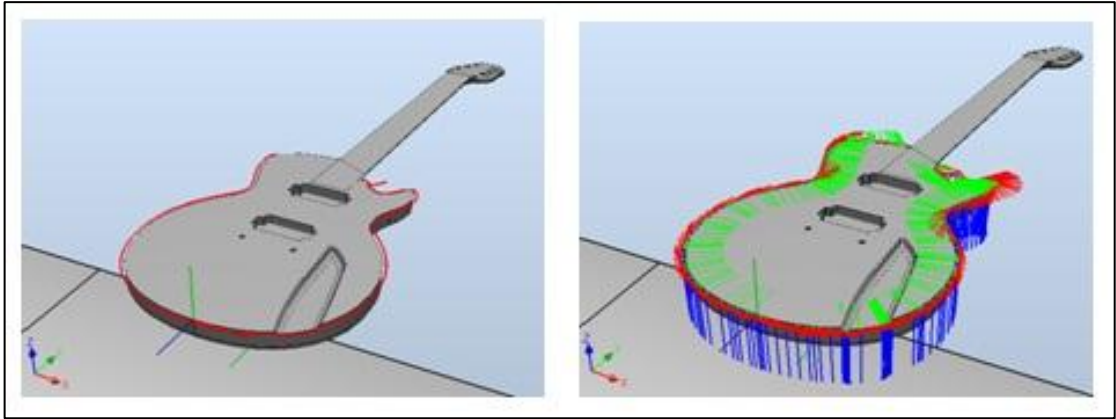
Figura 3.13 - a) Trajetória gerada; b) orientação dos diferentes targets

3.4. Trajetória gerada e configurações do robô

Estando a trajetória e os diferentes *targets* definidos, estes são guardados em relação ao *workobject* que foi escolhido. Uma das dificuldades que surgiu nesta fase foi o facto do software gerar automaticamente a orientação do elemento terminal nesses *targets* e quando o controlador virtual calcula a configuração do robô para cada um, encontra várias soluções, sendo que por vezes a escolha dessa configuração não foi a melhor tendo em conta toda a trajetória.

Na Figura 3.14 é possível observar um exemplo de como no mesmo *target* pode existir mais do que uma configuração.
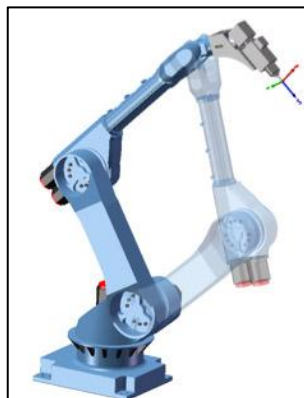
Figura 3.14 - Diferentes configurações do robô para o mesmo ponto [24]

Cada uma das diferentes configurações corresponde a uma das várias soluções da cinemática inversa do robô na posição pretendida. Compete então ao utilizador redefinir as orientações de alguns dos *targets* e escolher a configuração mais adequada do robô tendo em conta toda a trajetória. Para tal, existe uma janela dedicada à escolha da melhor configuração do robô para a trajetória desejada (Figura 3.15).
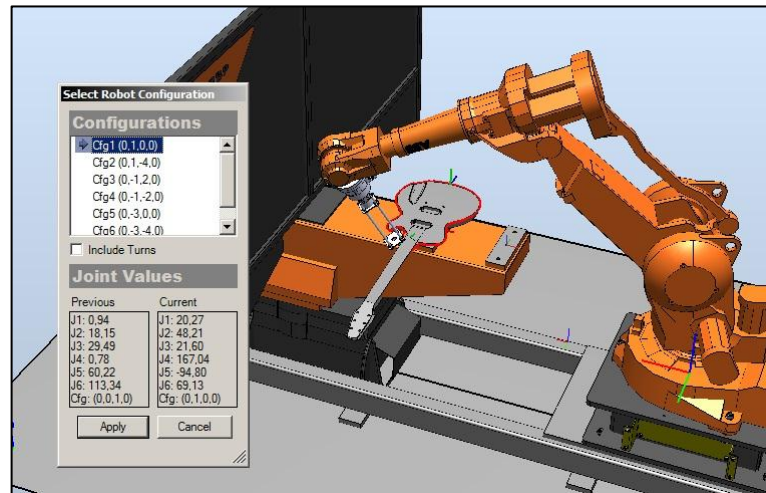
Figura 3.15 - Janela de seleção da configuração pretendida

Na janela da Figura 3.16 encontra-se uma lista de vetores, em que cada um corresponde a uma configuração diferente. A partir das 4 componentes de cada vetor é possível verificar em que quadrante de uma rotação inteira está situada cada junta.
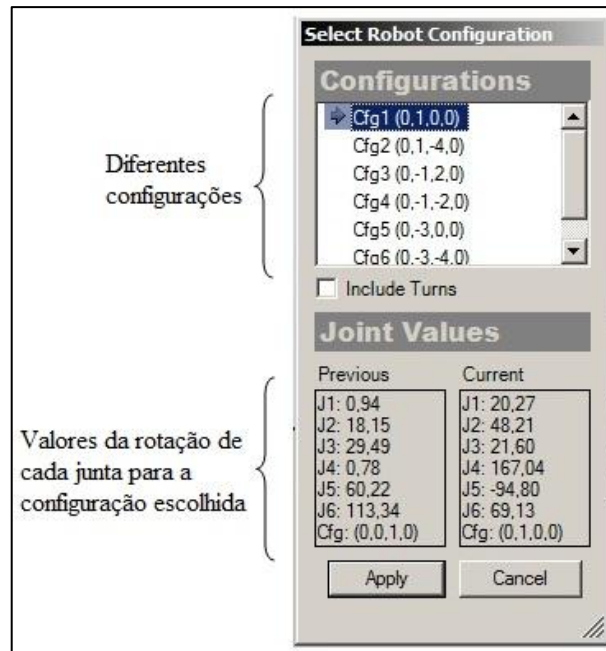
Figura 3.16 - Seleção da configuração desejada

Nesta fase é necessário ter bastante cuidado no que diz respeito às configurações definidas para uma dada trajetória. Pode acontecer serem atribuídas configurações bastante diferentes para essa mesma trajetória e não ser possível detetar essas diferenças graficamente. Em peças de elevada complexidade, como é o caso, torna-se portanto pertinente despender algum tempo na programação dedicada exclusivamente às configurações do robô ao longo da trajetória para evitar comportamentos imprevisíveis do robô podendo daí resultar colisões com os restantes constituintes da célula.

3.4.1. Influência da escolha do tipo de operação

À medida que se foi avançando nestes procedimentos de programação e geração de trajetórias, reparou-se que a seleção da superfície a ser trabalhada em conjunto com o tipo de operação escolhido (lateral ou topo) tem influência direta na configuração final do robô.

Numa primeira instância, na peça inferior da guitarra, escolheu-se a superfície lateral como superfície a trabalhar e utilizando uma operação de corte lateral (Figura 3.17).
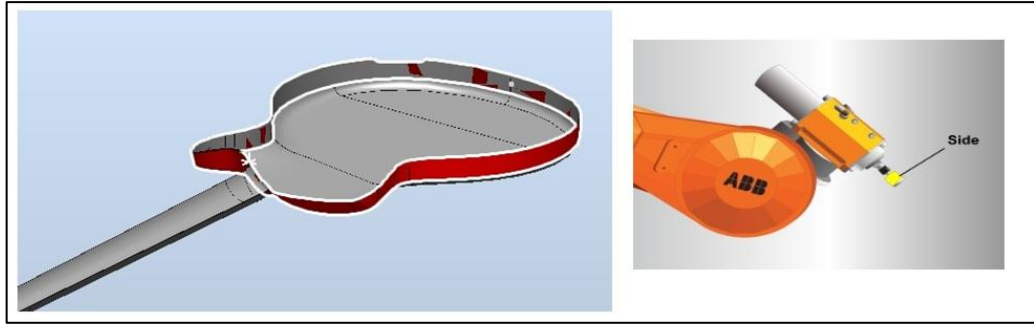
Figura 3.17 - Seleção da superfície lateral com operação de corte lateral

Como se pode observar na Figura 3.18 a configuração atribuída em alguns pontos não é a mais correta e tendo em conta que se está perante uma peça de geometria bastante complexa e uma vez que com este tipo de operação a ferramenta assume uma posição paralela à superfície, esta configuração não era uniforme ao longo de toda a trajetória.
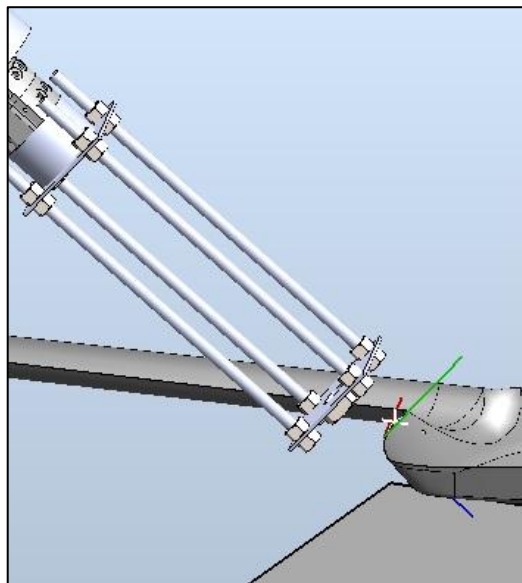
Figura 3.18 - Configuração resultante da seleção da superfície lateral com operação de corte lateral

A alternativa encontrada foi selecionar a superfície do plano de topo associado à espessura da peça, utilizando uma operação de corte de topo (Figura 3.19).
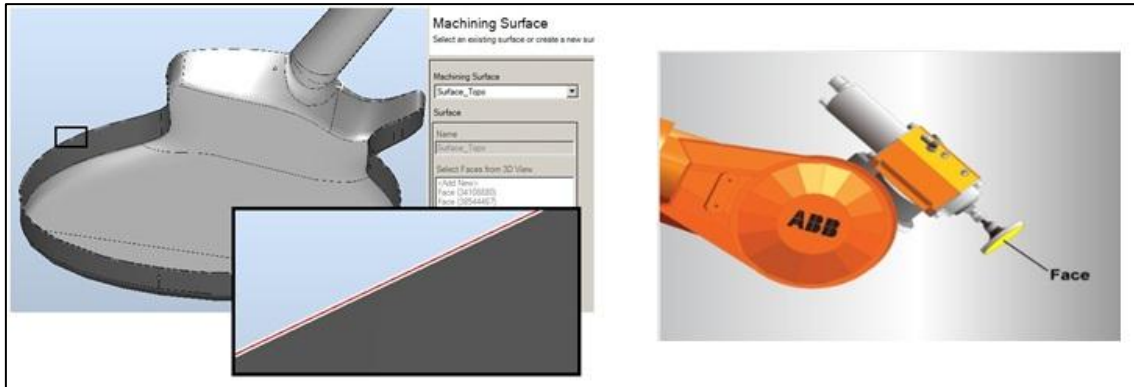
Figura 3.19 - Seleção da superfície de topo com operação de corte de topo

Como se pode observar na Figura 3.20, a configuração para o mesmo ponto do exemplo anterior é mais adequada ao corte que se pretende realizar e assim permanece ao longo de toda a trajetória uma vez que a ferramenta assume uma posição perpendicular à superfície indicada.
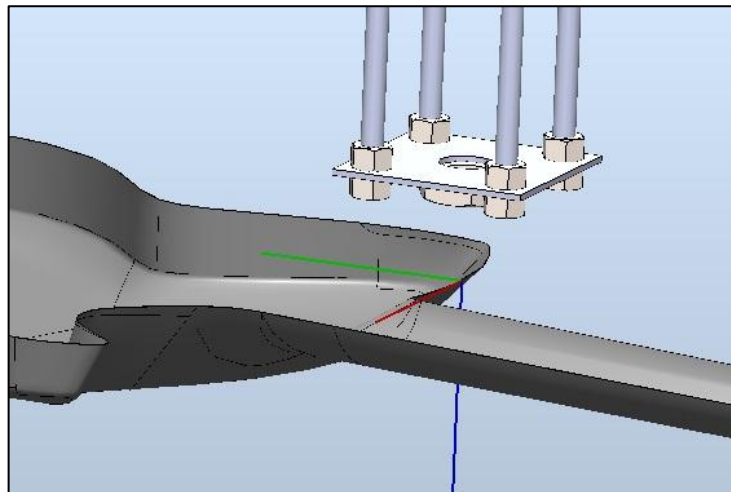
Figura 3.20 - Configuração resultante da seleção da superfície de topo com operação de corte de topo

3.5. Simulação da solução

Optou-se inicialmente por escolher a peça inferior do corpo da guitarra, uma vez que apresenta maior rigidez e maior facilidade de fixação. Ainda assim, gerou-se uma trajetória considerando apenas a parte correspondente ao corpo principal da guitarra uma vez que não foi possível fixar o braço (Figura 3.21).

Atendendo ao procedimento descrito na secção 3.3, foi então criada uma trajetória para a peça em causa e após ter a estrutura completa do programa, realizou-se a sincronização para o controlador virtual. Esta sincronização faz com que seja possível simular todo o processo com as características cinemáticas do robô da célula real. De referir que foram ainda criados separadamente vários *targets* de maneira a que tanto o ângulo de aproximação como o de saída da trajetória fossem o mais suaves possível.
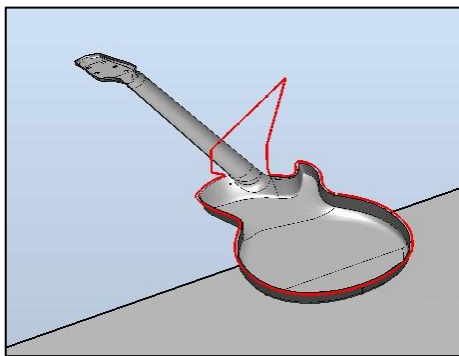
Figura 3.21 - Trajetória gerada

Para a mesma trajetória foram gerados programas tanto em controlo de posição como em controlo de força. Tendo sido feita a sincronização para o controlador virtual, obteve-se o programa em linguagem *RAPID* apresentado de uma forma muito reduzida na Figura 3.22.

```
MODULE Surface_Topo
    CONST robtarget INICIO:=[[28.7,345.1,-396.7],[0,0,-0.707106781,0.707106781
    CONST robtarget Aproach_1:=[[19.916563375,48.211395521,24.899635444],[0.00
    CONST robtarget Aproach_12:=[[19.916563407,-1.637507087,21.015448428],[0.0
    CONST robtarget p1:=[[-0.003965682,-0.077683129,0.996970213],[0.001346523,
    CONST robtarget p2:=[[-6.725029763,-0.071066697,0.919903136],[0.008006789,
    CONST robtarget p3:=[[-9.819978947,-0.064430804,0.830304971],[0.011721726,
    (...)
PROC SolutionFC_Teste1()
    FCDeact;
    FCCalib FCLoadData;
    Path_5;
ENDPROC
PROC Path_5()
    MoveJ INICIO,v50,z5,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
    MoveJ Aproach_1,v50,z5,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
    MoveL Aproach_12,v50,z5,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
    FCSpdChgAct 20\NonStopAllTime;
    MoveL p1259,v20,z1,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
    MoveL p1260,v20,z1,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
   (...)
    FCSpdChgDeact;
    MoveL Depart_1,v20,z1,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
    MoveJ INICIO,v50,z5,Ferramenta2\WObj:=topoguitar;
ENDPROC
```

Targets da trajetória

Movimento de aproximação

Início do controlo de força (ref = 20 N)

Fim do controlo de força

Movimento de afastamento da trajetória

Figura 3.22 - Programa em linguagem *RAPID* obtido após sincronização com controlador virtual

3.6. Síntese

Antes de se passar à fase de implementação, é apropriado retirar algumas conclusões nesta fase no que diz respeito a todo este processo de simulação e programação *off-line* do robô para operações de acabamento e, naturalmente, ao próprio software de programação em geral.

O primeiro contacto com o *RobotStudio* foi bastante agradável, uma vez que o ambiente de trabalho revela-se muito apelativo e bastante *user friendly*, o que torna o processo de aprendizagem em relação à programação *off-line* bastante facilitado. Tendo em conta que é um software com um modo de simulação essencialmente gráfico torna todo o procedimento de programação/simulação muito intuitivo. Acrescentando a isto o facto de se ter um controlador virtual incorporado, é possível ter uma ideia bastante realista dos movimentos que vão ser realizados pelo robô na célula real.

Uma vez que os desenhos 3D das peças a serem trabalhadas foram fornecidos pela empresa Ideia.m, é necessário apenas ter atenção ao processo de importação para o software de programação, nomeadamente à extensão escolhida. Quanto à interface e ferramenta utilizada, foi necessário um trabalho de modelação e posteriormente importada a partir do *RobotStudio*,

tendo igualmente atenção à extensão utilizada. Após ter sido feito todo este processo de importação de geometrias e criação da célula virtual, é necessário um especial cuidado e estudo prévio dos sistemas de coordenadas a serem utilizados, tanto para o caso da ferramenta como para o caso da peça.

O recurso ao *Machining Power Pack* tornou todo o processo de geração de trajetórias bastante expedito, possibilitando obter rapidamente as primeiras soluções do *trimming* das peças constituintes da guitarra. Foi, no entanto, necessária uma observação rigorosa a todo o programa gerado, com especial atenção às configurações do robô, uma vez que se tratam de peças com geometria de elevada complexidade.

No caso particular do uso do controlo de força, notou-se alguma limitação do software, mais concretamente no programa *RAPID* gerado, devido ao facto de não ser possível realizar a simulação do controlo de força.

Em suma, o *RobotStudio* apresenta-se como uma opção válida para a programação *off-line* de células robotizadas dedicadas a operações de acabamento, contudo a sua aplicabilidade apenas poderá ser confirmada na célula real. Apesar de ter algumas limitações, é um software bastante expedito, tornando todo o processo de programação mais simples. O recurso ao *Machining Power Pack* revelou-se bastante produtivo uma vez que se despendeu relativamente pouco tempo em todo o processo de programação, mais concretamente na geração de trajetórias.

4. Implementação da Solução Desenvolvida

Neste capítulo é feita uma análise funcional aos recursos utilizados e, posteriormente, testada a aplicabilidade da solução desenvolvida. Todos os procedimentos adotados na realização dos ensaios são aqui detalhadamente apresentados e explicados, bem como os respetivos resultados experimentais.

4.1. Análise funcional da ferramenta e base de suporte

Como já foi referido anteriormente, optou-se por adaptar uma ferramenta idêntica àquela que é utlizada pela empresa Ideia.m no processo manual, através da criação de uma interface apropriada. Após a integração da ferramenta na célula robótica, verificou-se que o facto do *tool center point* ficar bastante afastado da flange do robô gera um momento fletor elevado, podendo acarretar problemas ao nível da exatidão posicional da ferramenta e, assim, afetar a qualidade final do acabamento.

Assim sendo, realizou-se um ensaio onde foram aplicadas várias cargas de peso conhecido e mediu-se com um comparador a flexão sofrida pelo suporte da ferramenta na direção da aplicação da carga. Para tal movimentou-se o robô até à posição ilustrada na Figura 4.1. Na Tabela 4 apresentam-se os valores obtidos nesse ensaio.
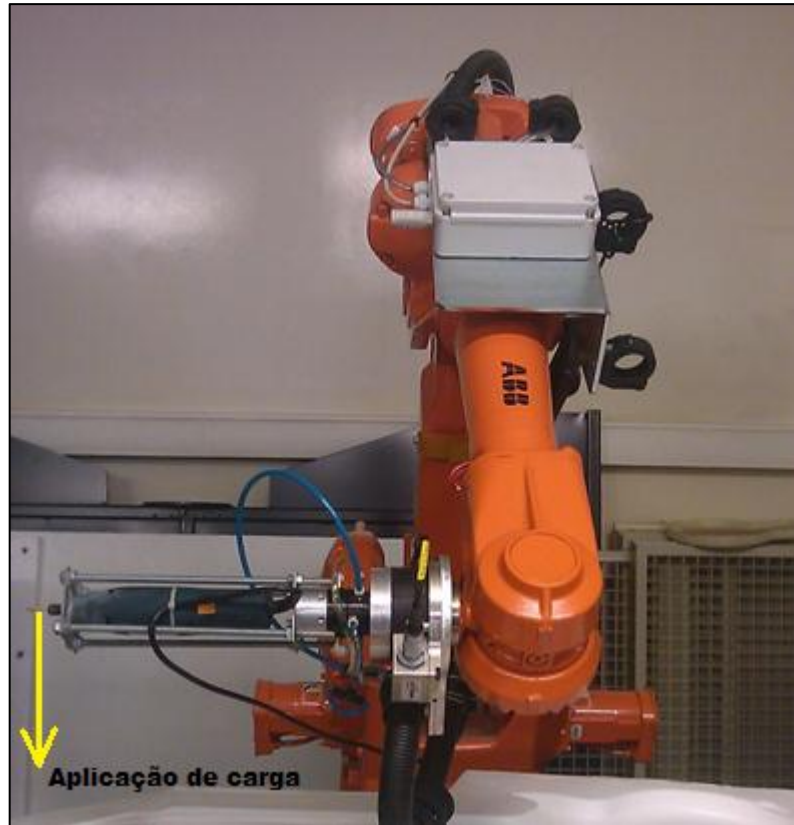
Figura 4.1 - Posicionamento do robô no ensaio de resistência à flexão do suporte da ferramenta

Tabela 4 - Valores de flexão do suporte da ferramente obtidos através da aplicação de cargas conhecidas

Carga aplicada na direção y [Kg]	Deslocamento [mm]
0	0
1	0,75
2	1,4
3	2,0
4	2,65
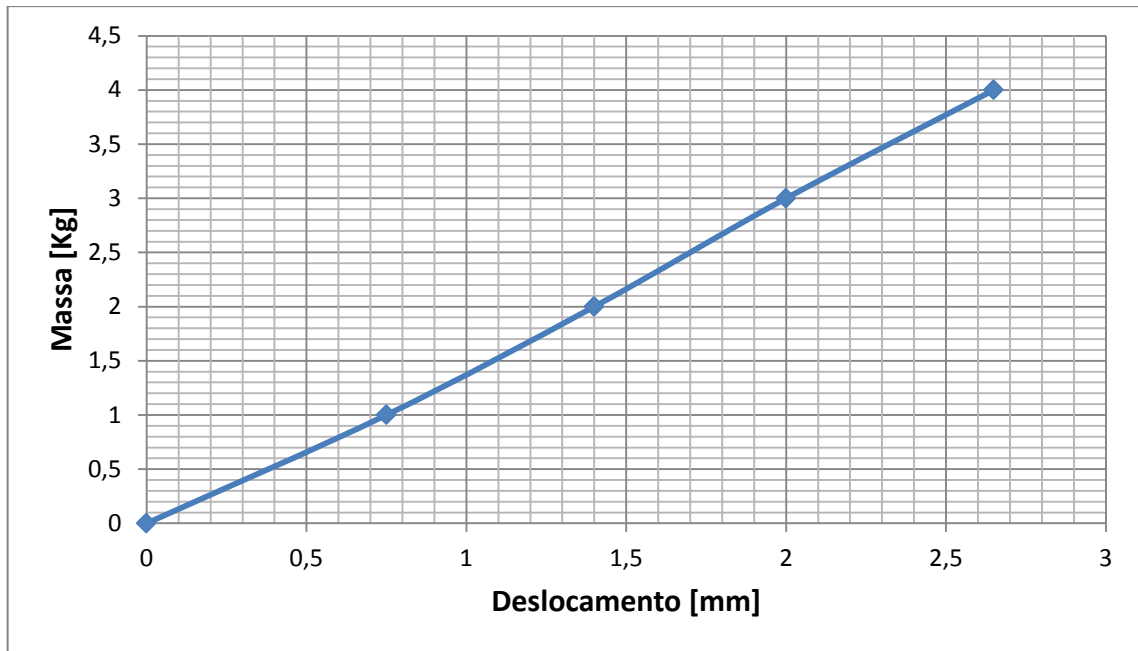
Figura 4.2 - Gráfico do ensaio de resistência à flexão

Observando o gráfico da Figura 4.2, pode-se concluir que a flexão do suporte da ferramenta provocada pelo aumento da carga é bastante linear.

Quanto à base utilizada, apesar de não ter sido modelada, a posição da peça em ambiente virtual foi estabelecida tendo em conta sua espessura. No entanto, quando é feita a transferência do programa para o controlador real, o robô reproduz exatamente aquilo que tinha sido visto anteriormente na simulação, pelo que deverá ser feita uma calibração da célula real uma vez que a reprodução do mundo real na simulação nunca é totalmente exata: os modelos das peças não têm exatamente as mesmas dimensões das peças reais e a posição da própria peça em simulação pode não ser exatamente igual à realidade. Assim, após a exportação dos programas gerados para o controlador real, é necessário fazer uma análise ao posicionamento da peça da célula real, de maneira a que esteja coerente com a posição da peça no *layout* virtual.

4.1.1. Correção da posição da peça na célula real

Este processo de calibração consistiu na criação de uma outra trajetória secundária contendo três *targets* da trajetória principal e posteriormente na movimentação do robô entre esses mesmos *targets*, posicionando assim a peça de modo a que a posição do modelo virtual coincidisse com a do modelo real (Figura 4.3).
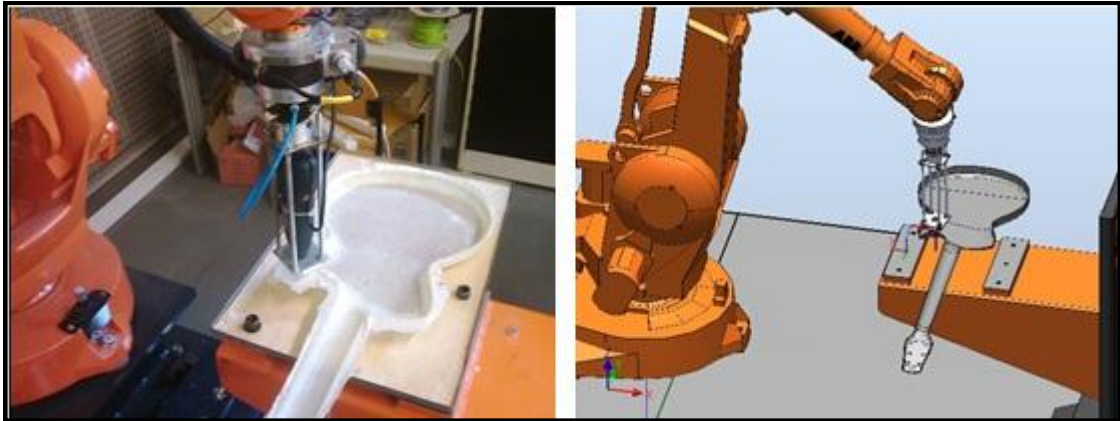
Figura 4.3 - Calibração da peça a trabalhar (real vs. virtual)

Após este processo, definiu-se no controlador do robô a posição correta do *workobject* estrategicamente criado na simulação. Assim, uma vez retiradas as coordenadas do ponto real, comparam-se com as coordenadas do ponto criado na simulação e procedeu-se à respetiva correção ao programa na consola. Deste modo, a célula real fica devidamente calibrada e após esta fase qualquer programa gerado em simulação pode ser diretamente aplicado na célula real.

4.2. Análise de cortes

Sendo o objetivo desta dissertação verificar a possibilidade de implementar uma solução automatizada para operações de acabamento em guitarras, efetuaram-se ensaios simples para quantificar a ordem de grandeza de alguns parâmetros envolvidos na operação de *trimming* e avaliar a sua influência no resultado final da operação.

Assim sendo, programou-se uma pequena trajetória linear perpendicular à peça (Figura 4.4), em controlo de posição e velocidade, e utilizando essa mesma trajetória várias vezes variaram-se parâmetros como a velocidade de avanço do robô, velocidade de rotação da ferramenta e o parâmetro *zone* nos diferentes cortes. No final, gerou-se outra trajetória (Figura 4.15), desta feita para que realizasse um pequeno *trimming* da superfície.
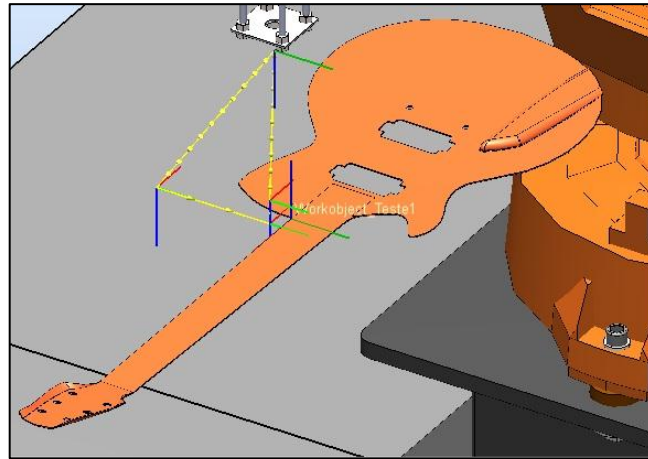
Figura 4.4 - Trajetória utilizada para realização de pequenos cortes

Para estes ensaios, a aplicação *Test Signal Viewer* da ABB tornou-se particularmente útil uma vez que se obtiveram, pela primeira vez, os valores das forças de contacto envolvidas no processo. De salientar que quando a ferramenta está ligada, é gerado um elevado nível de ruído (Figura 4.5). Sendo assim, aplicou-se um filtro passa-baixo (100 Hz) para obter um sinal mais "limpo" que permite identificar os valores das forças de contacto geradas.
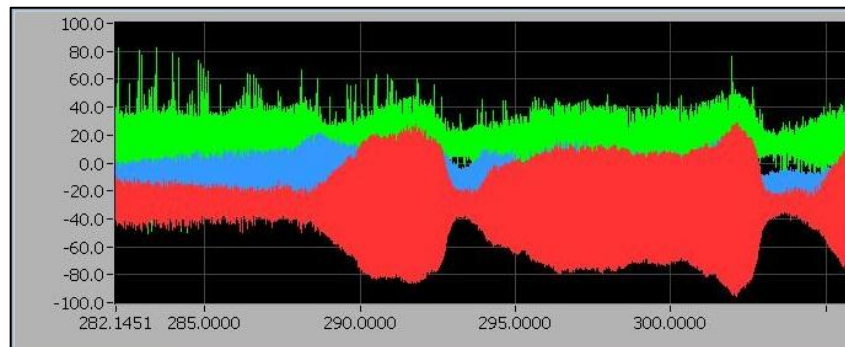
Figura 4.5 - Sinal no sensor de força na realização de um primeiro teste

A trajetória foi programada para que o robô se movimente unicamente na direção do eixo yy do referencial de base do robô, mantendo a orientação do elemento terminal fixa de modo a que a direção do eixo yy do sensor de força seja coincidente com a direção da trajetória. Na Figura 4.6 apresentam-se os vários ensaios realizados com os respetivos resultados finais. Na Figura 4.16 apresenta-se o resultado do ensaio de *trimming* realizado.
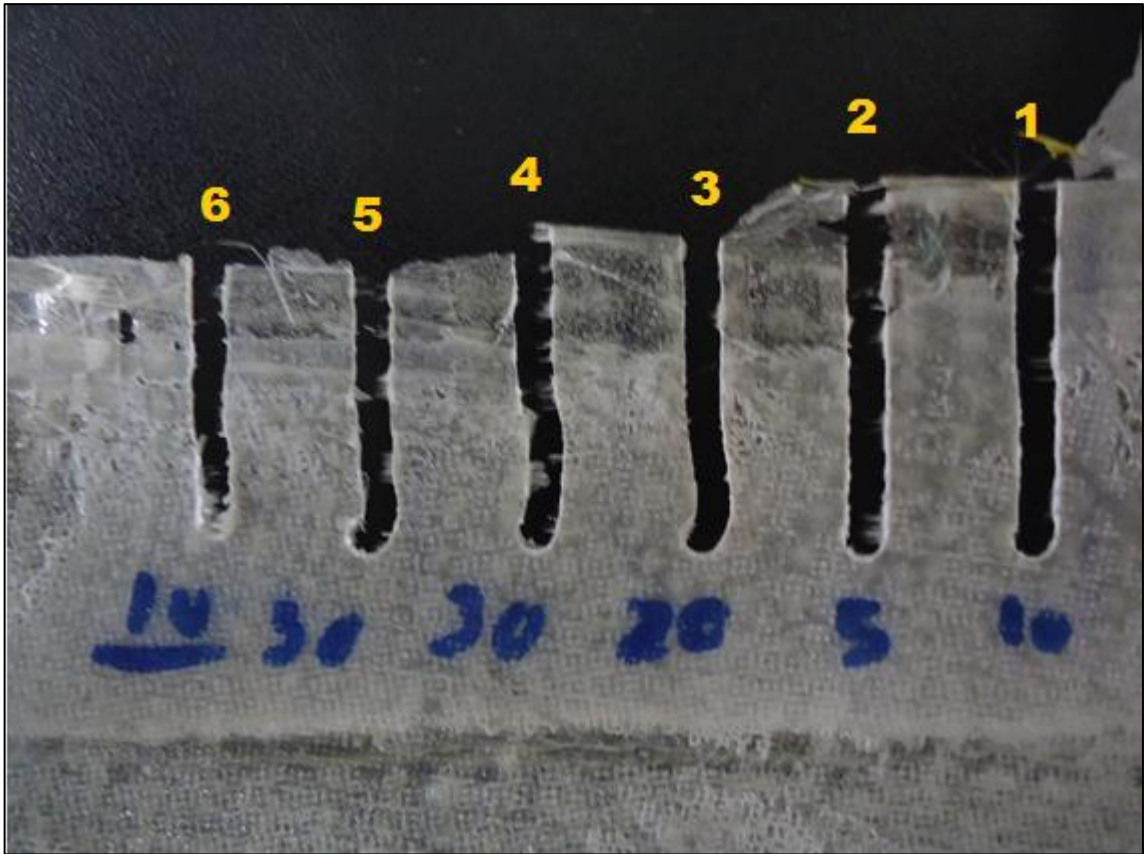
Figura 4.6 - Numeração dos diferentes ensaios realizados com respetivos resultados finais

Os ensaios 1, 2, 3, 4 e 7 tiveram como objetivo verificar de que maneira a variação da velocidade de avanço afetava a trajetória percorrida e observar a qualidade de acabamento daí resultante. Com o ensaio 5 pretendeu-se verificar de que maneira o parâmetro *zone* influenciava a qualidade do acabamento, enquanto o ensaio 6 serviu essencialmente para verificar qual a velocidade de rotação da ferramenta ideal para este tipo de operação, variando para isso este parâmetro.

<u>Ensaio 1</u>

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm;
- Velocidade de avanço do robô: 10 mm/s
- *Zone*: 1 mm

Resultados:

O resultado obtido está ilustrado na Figura 4.6, onde se pode observar o aspeto da peça após o corte. Como se pode comprovar, a trajetória percorrida foi bastante linear e o aspeto visual é aceitável.

Os valores das forças de contacto lidas pelo sensor de força podem ser observados na Figura 4.7. Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 9 N.
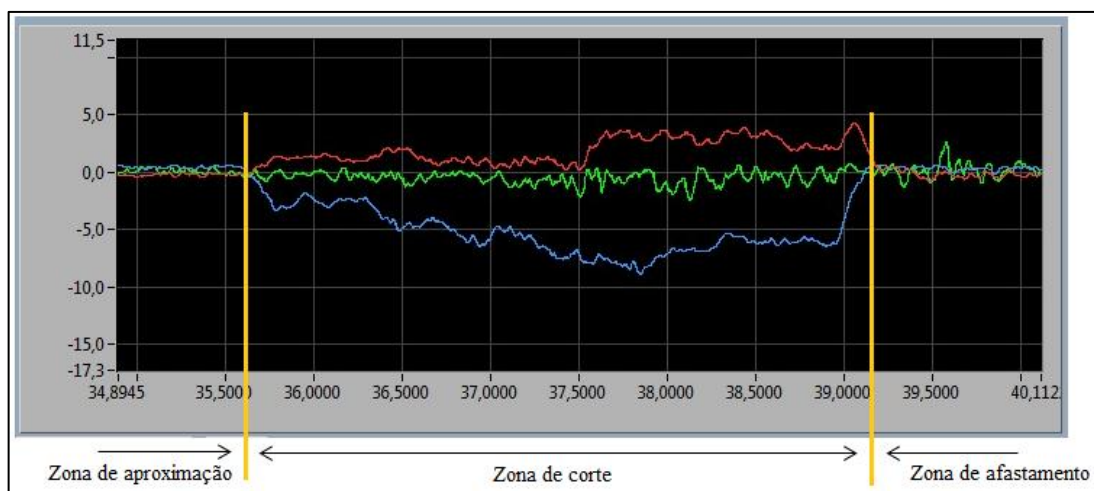
Figura 4.7 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 1

<u>Ensaio 2</u>

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 5 mm/s
- *Zone*: 1 mm

Resultados:

O resultado obtido está ilustrado na Figura 4.6. Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 4 N, como se pode verificar na Figura 4.8.
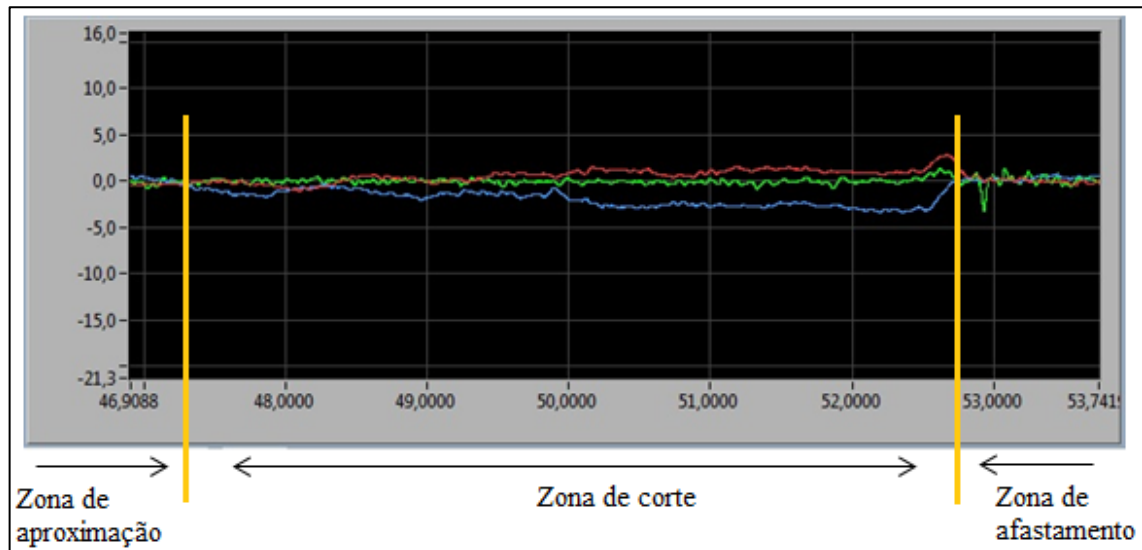
Figura 4.8 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 2

Ensaio 3

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 20 mm/s
- *Zone*: 1 mm

Resultados:

Na Figura 4.6, pode observar-se o aspeto da peça após o corte. Verifica-se que a trajetória percorrida foi pouco linear, principalmente na parte final.

Os valores das forças de contacto podem ser observados na Figura 4.9. Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 24 N.
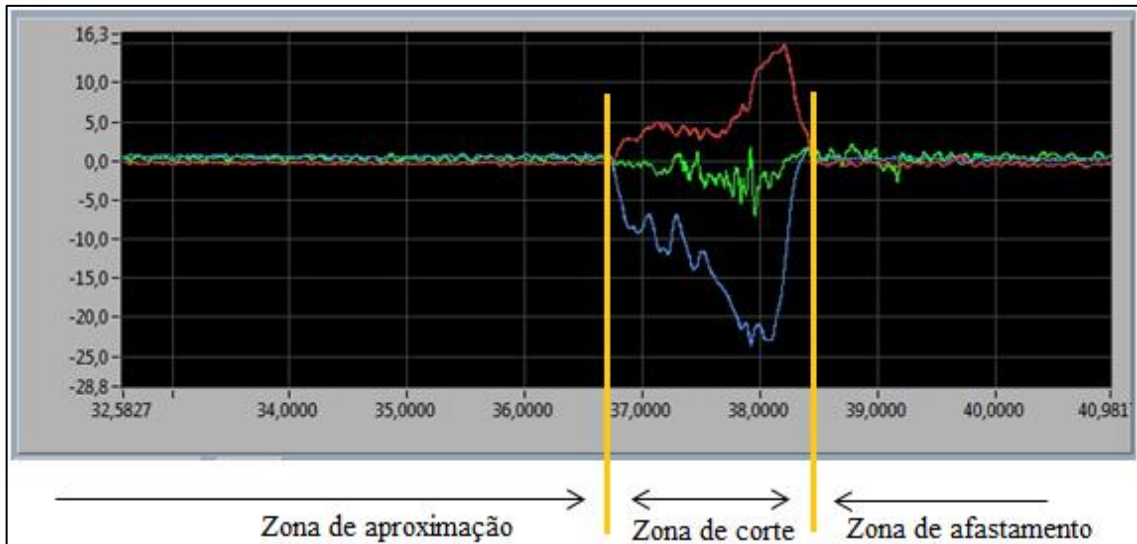
Figura 4.9 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 3

<u>**Ensaio 4**</u>

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 30 mm/s
- *Zone*: 1 mm

Resultados:

Verifica-se que a trajetória percorrida foi muito pouco linear em todo o percurso e o aspeto visual do acabamento é pouco aceitável (Figura 4.6).

Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 26 N (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 4

<u>Ensaio 5</u>

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 30 mm/s
- *Zone*: fine

Resultados:

O resultado obtido está ilustrado na Figura 4.6. Verifica-se que a trajetória percorrida foi pouco linear em todo o percurso, piorando ainda mais na parte final.

Os valores das forças de contacto lidas pelo sensor de força podem ser observados na Figura 4.11. Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 36 N.

Figura 4.11 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 5

Ensaio 6

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 26000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 10 mm/s
- *Zone*: fine

Resultados:

Verifica-se que a trajetória percorrida foi pouco linear em todo o percurso e o facto de se estar a trabalhar com velocidade de rotação da ferramenta inferior a qualidade acabamento piorou (Figura 4.6).

Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 45 N (Figura 4.12).
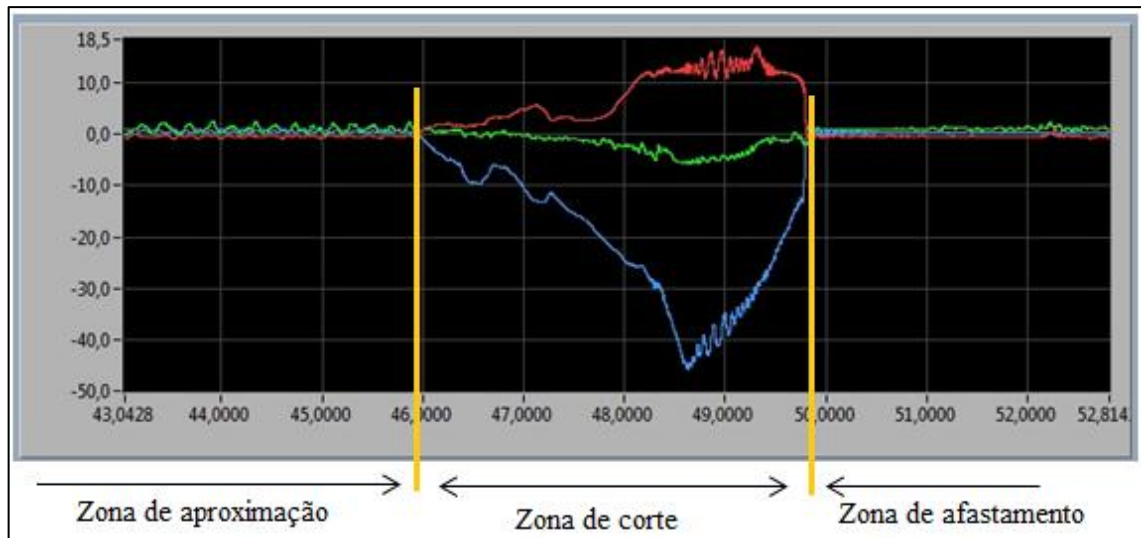
Figura 4.12 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 6

Ensaio 7

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 2,5 mm/s
- *Zone*: fine

Resultados:

O resultado obtido está ilustrado na Figura 4.13, onde se pode observar o seu aspeto após o corte. A trajetória percorrida foi linear em todo o percurso, no entanto a qualidade do acabamento ficou afetada devido a baixa velocidade de avanço.
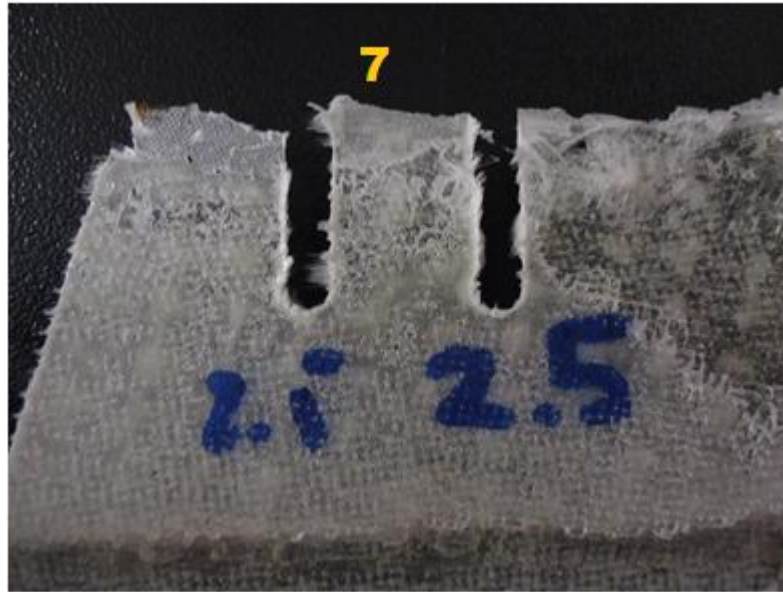
Figura 4.13 - Aspeto final do *trimming* após o ensaio 7

Os valores das forças podem ser observados na Figura 4.14. Neste caso a força máxima gerada em yy foi cerca de 3 N.

Figura 4.14 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 7

Ensaio 8

Condições:

- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- Velocidade de avanço do robô: 10 mm/s
- *Zone*: fine

Resultados:

O resultado obtido está ilustrado na Figura 4.16, onde se pode observar o aspeto final da superfície após o corte. Verifica-se que a trajetória percorrida foi linear em todo o percurso, com uma qualidade de acabamento bastante aceitável, tanto na direção xx como na direção yy. Os valores das forças de contacto lidas pelo sensor de força podem ser observados na Figura 4.17. Neste caso a força gerada em yy foi cerca de 4 N enquanto na direção xx foi aproximadamente 3 N.

Figura 4.15 - Trajetória utilizada para realização do primeiro ensaio de *trimming*
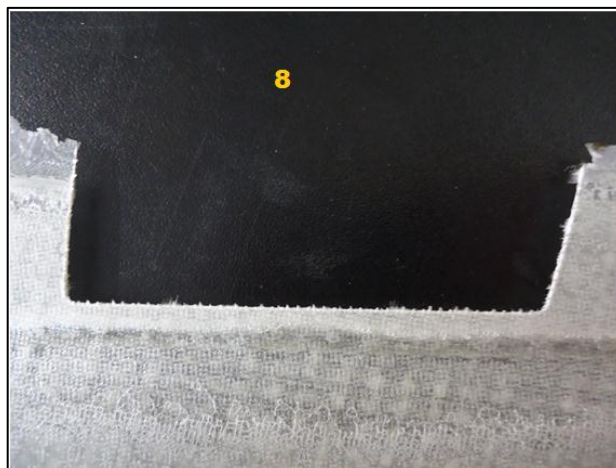
Figura 4.16 - Aspeto final do *trimming* após o ensaio 8
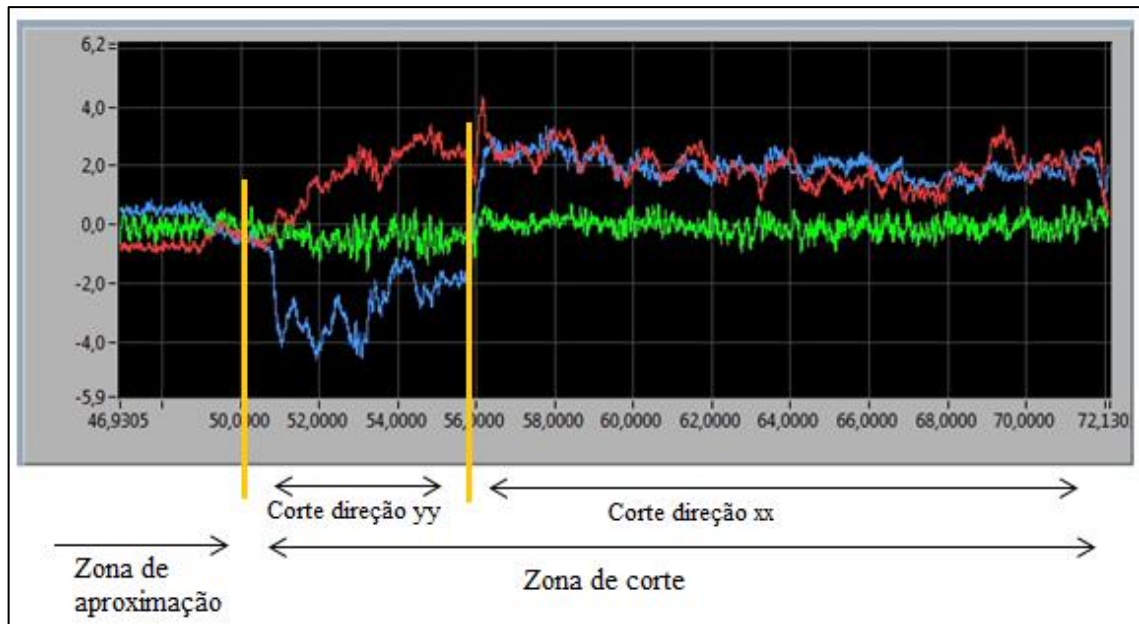
Figura 4.17 - Leitura do sinal proveniente do sensor no ensaio 8

4.3. Análise de cortes ao corpo da guitarra

Após concluída esta fase onde foram feitos os primeiros ensaios e que serviram essencialmente para se ter uma primeira noção da potencialidade, tanto da célula robótica como da própria solução, e para saber como variava a qualidade do acabamento em função de vários parâmetros, tornou-se pertinente realizar alguns ensaios que envolvessem o corte do contorno (*trimming*) do corpo da guitarra.

Como tal, tirando partido do procedimento explicado na secção 3.3, programou-se uma série de trajetórias que efetuassem o contorno parcial de uma peça e, após passagem do programa para o controlador real, realizaram-se os ensaios necessários. Teve-se como preocupação a criação de novos *targets* para que tanto a aproximação como o afastamento da zona de corte fosse o mais suave possível de modo a não prejudicar a qualidade do acabamento. Foi ainda criado um *target* de início e fim da trajetória situado acima da peça.

Ensaio 1:

Este primeiro ensaio teve como objetivo efetuar a trajetória indicada na Figura 4.18. As condições do ensaio bem como os resultados obtidos são indicados de seguida.
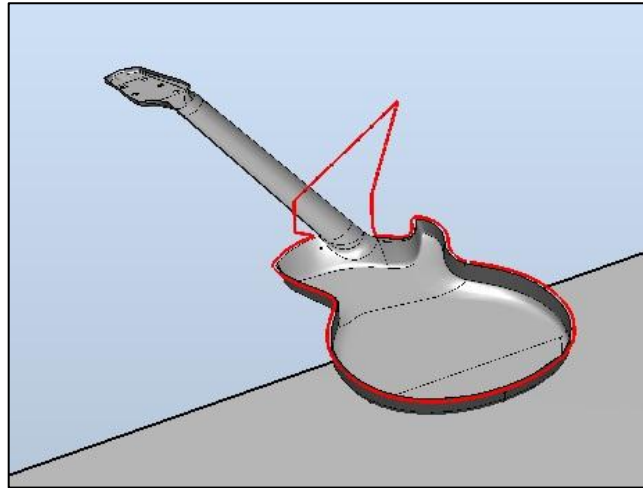
Figura 4.18 - Trajetória utilizada no *trimming* do corpo da guitarra para o ensaio 1

Condições:

- Controlo de posição e velocidade
- Velocidade de avanço do robô: 10 mm/s
- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- *Zone*: 1 mm
- *Offset*: 10 mm

Resultados:

O resultado obtido está ilustrado na Figura 4.19, onde se pode observar o aspeto final da superfície após o corte.
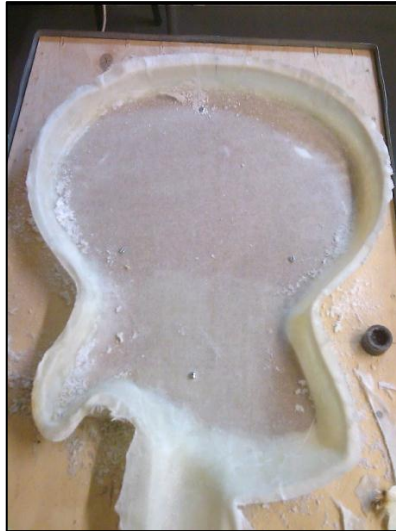
Figura 4.19 – Resultado final do ensaio 1

Comentários:

Neste ensaio verificou-se que, apesar de ter sido programado um *offset* constante ao longo de toda a trajetória, tal não se verificou no final do ensaio. Houve nitidamente zonas da peça que sofreram uma maior remoção de material e inclusive zonas que não foram cortadas.

Outro aspeto verificado foi que a ferramenta não tinha superfície de corte suficiente para algumas zonas da peça e portanto não foi capaz de compensar eventuais erros de posicionamento no eixo zz.

<u>Ensaio 2:</u>

Este ensaio surge na sequência do anterior. Optou-se por dividir a mesma trajetória utilizada em quatro secções (Figura 4.20), e associar a cada uma um *workobject* diferente, de maneira a compensar eventuais erros de posição. As condições do ensaio bem como os resultados obtidos são indicados de seguida.
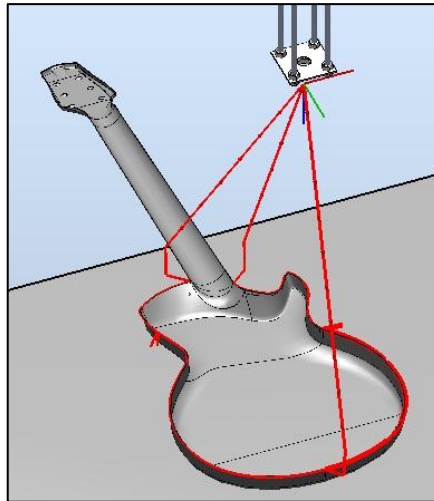
Figura 4.20 - Trajetória utilizada no *trimming* do corpo da guitarra no ensaio 2

Condições:

- Controlo de posição e velocidade
- Velocidade de avanço do robô: 10 mm/s
- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- *Zone*: 1 mm
- *Offset*: 0 mm

Resultados:

Figura 4.21 - Resultado final do ensaio 2

Comentários:

Neste ensaio a trajetória percorrida já esteve mais coerente com a que foi programada, ainda que fosse necessário corrigir a cota de duas das quatro secções da trajetória. Para este ensaio a maior dificuldade foi lidar com da fraca rigidez do suporte da ferramenta, ou seja, enquanto que no primeiro ensaio o *offset* gerado garantia alguma margem de manobra perante eventuais erros de posicionamento associados à flexão do suporte, neste segundo ensaio tal *offset* não se verificava e portanto o erro de posicionamento derivado da flexão sofrida pelo suporte da ferramenta foi notório danificando parcialmente a peça em algumas zonas, como se pode observar na Figura 4.21.

<u>Ensaio 3:</u>

Neste ensaio utilizou-se a mesma trajetória do ensaio anterior (Figura 4.22) mas, desta feita, utilizando o controlo ativo de força.

As condições do ensaio, bem como os resultados obtidos, são indicados de seguida.
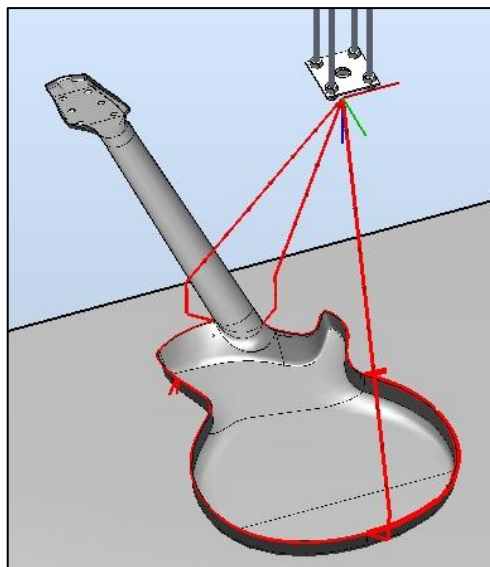
Figura 4.22 - Trajetória utilizada no *trimming* do corpo da guitarra no ensaio 3

Condições:

- Controlo de força *FC_SpeedChangeProcess*
- Referência: 20 N
- 2 patamares de velocidade
- Velocidade de avanço do robô: [5; 50] mm/s
- Velocidade de rotação da ferramenta: 35000 rpm
- *Zone*: 1 mm
- *Offset*: 0 mm

Resultados:

Figura 4.23 - Resultado final do ensaio 3

Comentários:

Uma vez que foi utilizado o controlo de força, foi bem percetível a mudança de velocidade quando a ferramenta entrou em contacto com a peça. Tendo em conta que a velocidade programada correspondente ao patamar de velocidade inferior era muito baixa, a qualidade do

acabamento foi bastante afetada uma vez que houve um sobreaquecimento da superfície de corte (Figura 4.23).

A realização destes ensaios permitiu retirar várias conclusões em relação ao processo de corte bem como os parâmetros envolvidos. A velocidade de avanço do robô é um parâmetro muito importante na definição da qualidade final do acabamento, ou seja, verifica-se que com o aumento da velocidade de avanço do robô a qualidade do acabamento é afetada negativamente. Este facto deve-se essencialmente à fraca rigidez do suporte da ferramenta, isto é, com o aumento da velocidade de avanço do robô as forças de contacto aumentam e, consequentemente, há uma maior flexão da ferramenta e portanto existe um desvio entre a trajetória programada e a trajetória percorrida. Contudo, se a velocidade for demasiado baixa, a qualidade do acabamento também é afetada negativamente devido à elevada temperatura que é atingida na superfície de corte. A velocidade da trajetória do robô de 10 mm/s foi a que levou à obtenção de resultados mais satisfatórios.

Nos cortes efetuados ao contorno da guitarra, verificou-se que a utilização do controlo de posição e velocidade é o modo de controlo mais apropriado para este tipo de operação tendo em conta que a quantidade de material a remover é constante. A utilização do controlo ativo de força com o modo *FC_SpeedChangeProcess* revela-se mais apropriado quanto existe uma quantidade variável de material a ser removido. Na Tabela 5 pode observar-se uma síntese dos ensaios realizados e respetivos resultados da força gerada.

Tabela 5 - Síntese de condições e resultados obtidos nos ensaios realizados

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>Ensaio</th><th>Veloc. de rot. da ferramenta [rpm]</th><th>Veloc. de avanço do robô [mm/s]</th><th>Parâmetro Zone [mm]</th><th colspan="2">Força máxima [N]</th></tr>
<tr><td rowspan="11">Controlo de velocidade e posição</td><td rowspan="9">Cortes transversais</td><td>1</td><td>35000</td><td>10</td><td>1</td><td colspan="2">9</td></tr>
<tr><td>2</td><td>35000</td><td>5</td><td>1</td><td colspan="2">4</td></tr>
<tr><td>3</td><td>35000</td><td>20</td><td>1</td><td colspan="2">24</td></tr>
<tr><td>4</td><td>35000</td><td>30</td><td>1</td><td colspan="2">26</td></tr>
<tr><td>5</td><td>35000</td><td>30</td><td>fine</td><td colspan="2">36</td></tr>
<tr><td>6</td><td>26000</td><td>10</td><td>fine</td><td colspan="2">45</td></tr>
<tr><td>7</td><td>35000</td><td>2,5</td><td>fine</td><td colspan="2">3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2">35000</td><td rowspan="2">10</td><td rowspan="2">fine</td><td>xx</td><td>yy</td></tr>
<tr><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Cortes ao contorno da guitarra</td><td>1</td><td>35000</td><td>10</td><td>1</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>2</td><td>35000</td><td>10</td><td>1</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>Controlo ativo de força</td><td>3</td><td>35000</td><td>[5;50]</td><td>1</td><td colspan="2">-</td></tr>
</table>

4.4. Análise funcional do novo suporte da peça

Tal como foi referido anteriormente, o suporte da peça inicialmente idealizado foi fornecido já numa fase final da dissertação e portanto o que se fez foi fixar esse mesmo suporte à mesa posicionadora (Figura 4.24).

Figura 4.24 - Nova base de suporte da peça

Desta forma foi possível testar e analisar uma das potencialidades do *Machining Power* Pack indicadas na seção 2.4.1, mais concretamente a criação de uma rotina de calibração automática. Para tal, foram criados os 5 pontos de referência que foram posteriormente comparados com 5 pontos criados na célula real (Figura 4.25).
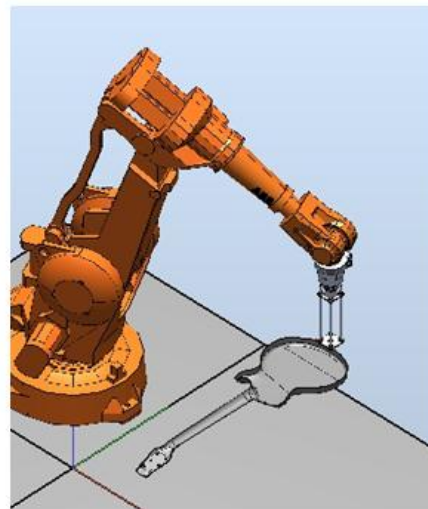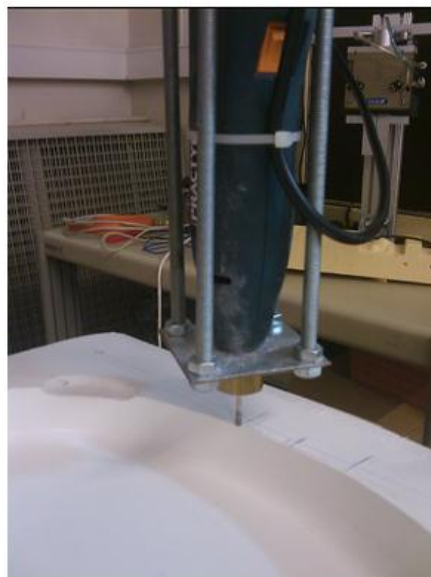
Figura 4.25 - Comparação dos *targets* entre célula real e virtual

Verificou-se que o processo automático de geração da rotina de calibração disponibilizado pelo software de programação está incompleto, não permitindo a sua utilização imediata, conforme referido no respetivo manual de utilização. Foram identificados os problemas e alterada manualmente a programação para que a rotina de calibração possa ser utilizada. Assim, foi necessário adicionar manualmente os dez *targets* de referência (célula real mais célula virtual) e acrescentar a instrução correspondente à calibração do *workobject* escolhido (Figuras 4.26 e 4.27).
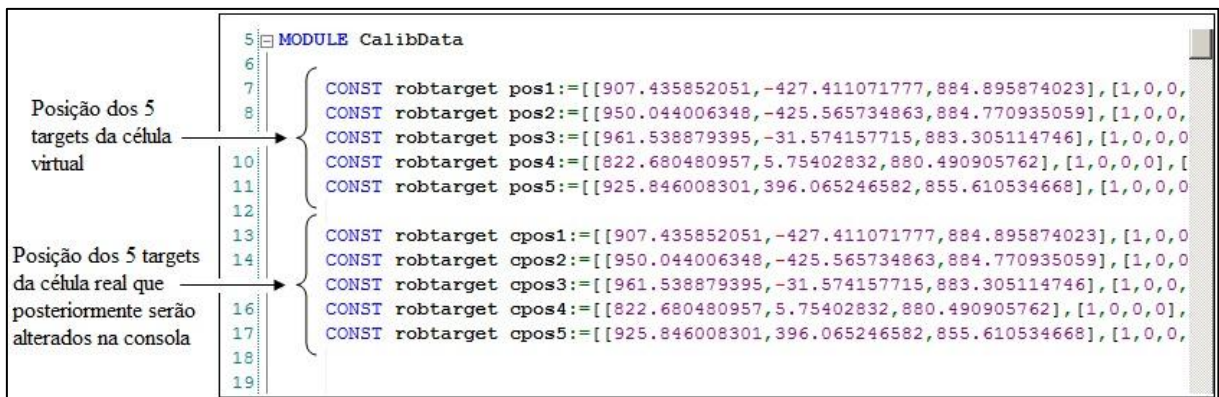
Figura 4.26 - Definição do posicionamento dos *targets* de referência

```
73  PROC Calibration_routine()
74
75  CalibWOBJ topoguitar,  pos1,  pos2,  ...,  pos5,  cpos1,  cpos2,  ...,  cpos5;
76
77  ENDPROC
78
```
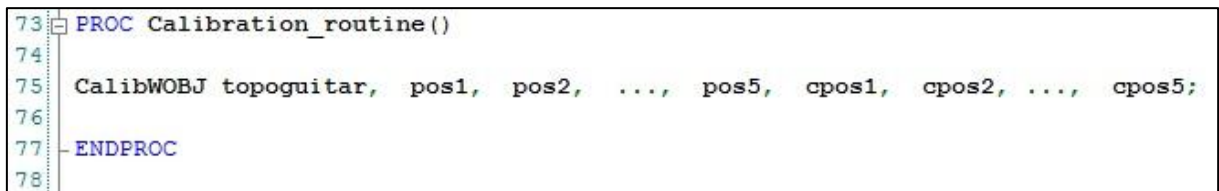
Figura 4.27 - Criação da instrução de calibração na rotina gerada

Após este procedimento, exportou-se o programa para o controlador real e redefiniram-se novamente as posições dos *targets* correspondentes à célula real (designados cpos) e correu-se o programa na consola. Com este procedimento verificou-se que o controlador realizou a calibração do *workobject* desejado, no entanto o novo valor obtido para o *workobject* apresentava um erro de posicionamento elevado inviabilizando a calibração. No sentido de tentar avaliar o desempenho desta funcionalidade, optou-se por realizar um simples ensaio, em ambiente virtual, que permitisse avaliar o seu funcionamento. Assim, considerou-se que os *targets* da célula real correspondentes aos targets no modelo apenas se encontravam deslocadas numa única direção e de igual distância segundo o mesmo eixo. Após a execução da rotina de calibração em ambiente de simulação verificou-se que a atualização do *workobject* sofria uma alteração correta.

Não tendo no entanto sido possível identificar as causas do não funcionamento da rotina de calibração com os dados reais da célula, foi decidido não utilizar esta funcionalidade.

4.5. Análise de cortes ao corpo da guitarra utilizando o novo suporte da peça

Tendo em conta que a utilização da rotina de calibração automática conduziu a resultados pouco satisfatórios, a alternativa encontrada foi proceder a uma calibração do modelo. Para tal, identificaram-se cinco pontos da célula real e utilizou-se essa informação para reposicionar a peça em ambiente virtual e procedeu-se à programação da trajetória (Figura 4.28).
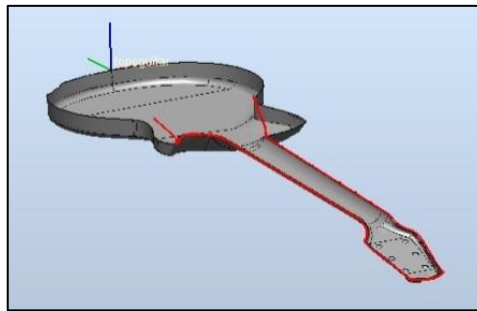
Figura 4.28 - Trajetória gerada no braço da guitarra

Os resultados deste ensaio estão representados nas Figuras 4.29 e 4.30. Na zona assinalada da Figura 4.29 houve um sobreaquecimento da superfície devido à reduzida área de corte da ferramenta. Verificou-se que neste ensaio, mesmo recorrendo a uma base de suporte mais adequada, é ainda necessário dispor de um sistema de fixação auxiliar da peça para que esta não sofra variações no posicionamento nas zonas mais críticas resultante da força exercida pelo robô. Esta variação de posicionamento foi notada tanto na zona assinalada da Figura 4.29, onde a ferramenta entrou em contacto com o material, como na zona assinalada da Figura 4.30 onde houve uma mudança de direção da trajetória e consequentemente da força exercida.

Figura 4.29 - Aspeto final do *trimming* após ensaio

Figura 4.30 - Aspeto final do *trimming* após ensaio na zona mais crítica

Com este ensaio pode-se concluir que o uso da calibração do modelo, apesar de mais trabalhoso e demorado, é um processo que permite obter resultados mais satisfatórios quando comparado com o uso da rotina de calibração automática.

5. Conclusões e trabalhos futuros

A realização desta dissertação permitiu perceber e fundamentar conclusões no que diz respeito à aplicação de robôs industriais em operações de acabamento e em particular no *trimming* de guitarras feitas em materiais compósitos.

Apesar dos robôs industriais terem sido introduzidos na realização de operações de acabamento na década de 70, esta é uma área ainda em grande desenvolvimento. Assim, toda a divulgação de informação referente à programação *off-line* de robôs bem como os detalhes de algumas soluções existentes é ainda muito reduzida, tornando o processo de contextualização do tema um pouco moroso. Por outro lado, a ausência de informação relativamente ao processo de *trimming* de guitarras, limitou bastante a programação e execução dos ensaios realizados. Uma vez que não existe um valor ótimo na definição dos parâmetros de velocidade de avanço do robô e força de contacto envolvidas, todo este processo de geração de trajetórias, passou por uma fase de sucessivas iterações de modo a obter a melhor qualidade de acabamento possível.

O reduzido número de peças fornecidas limitou de certa maneira a análise dos parâmetros envolvidos na operação de corte, isto é, de que maneira influenciam diretamente ou conjugados entre eles a qualidade do acabamento. Assim, tentou-se sempre rentabilizar ao máximo as peças que foram disponibilizadas.

5.1. Conclusões

A análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados permite encerrar algumas conclusões acerca de todos os procedimentos e da própria metodologia utilizada.

Os ensaios realizados com controlo de velocidade e posição demonstraram que a programação *off-line*, gráfica e intuitiva permite que se obtenha um programa muito próximo

daquilo que é a solução final. A utilização do método de programação *off-line* permite a geração de trajetórias com base no modelo virtual da peça. Assim, a criação de um novo programa é realizado em tempo bastante reduzido sem que haja necessidade de parar a produção na célula robotizada. O recurso à extensão *Machining Power Pack* como auxiliar de programação e geração de trajetórias tornou-se uma mais-valia em todo o processo de programação *off-line* uma vez que é bastante intuitivo, poupando assim tempo em todo o processo de geração de trajetórias e programação. No entanto, o facto de se estar a trabalhar com uma peça com geometria de elevada complexidade dificultou o processo de simulação, com especial destaque para as configurações atribuídas ao robô em cada ponto da trajetória. Outro aspeto que se pode constatar devido à elevada complexidade da geometria da peça, foi a criação de um elevado número de pontos constituintes da trajetória gerada, prejudicando diretamente a capacidade de processamento do próprio controlador.

Os ensaios efetuados comprovaram uma elevada sincronia entre o ambiente virtual e o ambiente real da célula robótica e aqui o facto do software possuir um controlador virtual incorporado apresentou-se como uma das melhores características do software. Contudo foi necessário intervir ao nível do código *RAPID* e efetuar algumas correções no próprio programa de modo a existir uma calibração o mais rigorosa possível ao nível do posicionamento dos componentes.

Uma vez que este tipo de solução constitui uma novidade no setor industrial, o projeto desenvolveu-se no sentido de validar os métodos propostos para uma industrialização e integração da solução numa linha de produção.

Através da análise dos ensaios de cortes transversais, em controlo de posição e velocidade, e observação dos respetivos resultados, é possível também tirar algumas conclusões. Em primeiro lugar, a qualidade do acabamento está diretamente relacionada com a velocidade de avanço do robô e quanto maior for este parâmetro, pior será a qualidade do acabamento. Este aspeto deriva essencialmente da fraca rigidez do suporte da ferramenta utilizado, ou seja, como a velocidades superiores a força de contacto é superior, existe uma maior flexão do suporte e, como tal, uma variação entre a trajetória percorrida e a trajetória programada. Por outro lado, se a velocidade for muito baixa, o acabamento daí resultante não é de todo desejável devido à elevada temperatura que é atingida na superfície de corte. A análise das forças de contacto envolvidas foi particularmente útil para o posterior uso do controlo de força uma vez que se obteve um primeiro valor de referência para este parâmetro.

Relativamente aos cortes na guitarra, os ensaios efetuados revelaram numa primeira instância que a calibração da célula robótica é um aspeto essencial para que todo o processo

seja realizado da melhor forma. Isto é, a calibração surge como um complemento a todo o procedimento de programação *off-line*, assegurando uma transição correta entre o ambiente virtual e o ambiente real. Tendo em conta que se trabalhou com peças de elevada complexidade, qualquer variação em termos posicionais da célula real para a célula virtual revela-se crítica e portanto foi necessário efetuar alguns ajustes no próprio programa *RAPID* e posteriormente recorrer ao método de programação *online*.

O recurso a uma base de suporte que fixe a peça em toda a sua superfície revelou-se como um fator determinante para a qualidade final do acabamento. Tendo em conta que se utilizou um suporte mais simples durante os ensaios, houve zonas da superfície da peça que não estavam devidamente fixas e quando a ferramenta fez a primeira passagem de corte detetou-se a existência de uma grande oscilação da própria peça, comprometendo assim a qualidade do acabamento. Contudo, mesmo com a utilização de uma nova base de suporte que abrange toda a superfície da peça, é necessário dispor de um sistema auxiliar de fixação da peça para minimizar eventuais variações posicionais causadas pelas forças de contacto exercidas pelo robô.

Quanto à utilização do controlo ativo de força, o próprio software possui duas opções: o *FC_PressureProcess* e o *FC_SpeedChangeProcess*. O primeiro caso foi logo à partida descartado, uma vez que correr-se-ia o risco da trajetória não ser cumprida tendo em conta a força de referência indicada, o que para este caso não seria de todo desejável. Uma vez que no processo de corte trabalha-se com uma taxa de remoção de material constante e com forças de contacto a sofrerem pouca variação, o modo *FC_SpeedChangeProcess* revelou-se como um processo pouco útil para o caso em estudo, uma vez que a velocidade de avanço do robô que daí resulta será constante ao longo de toda a trajetória. De referir também que a ferramenta utilizada introduz um sinal de ruído bastante elevado no sensor de força, o que inviabiliza de certa forma a leitura correta das forças de contacto envolvidas no processo, necessitando assim de se recorrer à aplicação de um filtro passa-baixo.

Atendendo a que todo este tema, concretamente a utilização de uma célula robótica para realização do *trimming* de guitarras feitas em materiais compósitos, surge como alternativa ao processo manual atualmente utilizado, é apropriado apresentar uma comparação entre estes dois tipos de processo.

Tendo em conta que as geometrias são bastante complexas e feitas a partir de processos de moldação, podem eventualmente existir variações dimensionais no formato do material a ser removido. Assim, a automatização do processo apresenta uma desvantagem em relação ao processo manual que é precisamente o aspeto da flexibilidade, isto é, se na linha de produção

surgir uma peça com um possível defeito, o operador manual consegue ajustar ao máximo essas eventuais variações dimensionais e possivelmente consertar a peça, enquanto no processo automático, nomeadamente na utilização de um robô, tal não acontece.

Para o caso de se pretender um acabamento final, em que as peças fiquem prontas para a fase de colagem, deve ser feito um reajuste muito rigoroso ao nível de programação e calibração. Como alternativa, é possível programar o robô para que realize um acabamento intermédio, deixando um pequeno *offset* a ser removido manualmente numa fase posterior.

Quanto à qualidade do acabamento, não foram notadas diferenças muito significativas, no entanto no processo automático o acabamento é muito mais uniforme e não existe o risco de um eventual erro humano que danifique a peça como no caso do processo manual.

5.2. Trabalhos Futuros

A realização desta dissertação constitui o início da pesquisa numa área tecnológica ainda muito recente. Logo, as principais dificuldades que foram surgindo foram fruto essencialmente da falta de informação e da novidade que este tipo de solução representa na indústria.

Assim, já tendo neste projeto uma base de conhecimentos sólida, é possível propor a execução de outros estudos e/ou testes de modo a aperfeiçoar a solução que foi criada.

Tendo em conta o facto de se estar a trabalhar com peças de geometria bastante complexa, a própria modelação 3D foi identificada como uma influência bastante relevante para o sucesso de todo o processo de programação. Assim, propõe-se a execução de testes baseando-se em modelos obtidos através de um método de levantamento rigoroso.

Sugere-se também algumas alterações nos recursos utilizados na célula robótica real. Na ferramenta utilizada acoplar um dissipador de energia de forma a minimizar o ruído gerado no sensor de força. No limite, propõe-se a criação de outro tipo de suporte para a ferramenta com uma rigidez e capacidade de rotação superior à da ferramenta utilizada, para que seja possível a utilização de velocidades de avanço do robô superiores sem comprometer a trajetória programada ou prejudicar o respetivo acabamento final. Propõe-se ainda a criação de um sistema de fixação auxiliar da peça na utilização da nova base de suporte para a realização dos cortes ao contorno da guitarra. Para que todo o processo de validação da célula seja apropriado, sugere-se que seja feita uma análise detalhada à própria rotina de calibração

automática para avaliar a sua efetiva funcionalidade. Eventualmente, como alternativa a este procedimento automático, poderá ser criado um algoritmo de calibração baseado num modelo matemático, que ajuste o *workobject* desejado com base em *targets* da célula real.

Por fim, deverá passar-se do estudo em laboratório para o estudo em células industriais de modo a concretizar-se e consolidar-se o conhecimento adquirido nesta dissertação.

Referências

[1] Koren, Y. (1987). *Robotics For Engineers.* Israel: McGraw-Hill.

[2] ABB. (22 de Setembro de 2011). *ABB robots deployed at HAVAL H6 SUV production line*. Obtido em Março de 2012, de http://www.abb.com/cawp/seitp202/8fe1afe5ee6f53ddc12579230062ba8a.aspx

[3] Fixell, P., Groth, T., & Isaksson, M. (2007). *A touching movement.* ABB Review.

[4] Teresko, J. (1 de Julho de 2005). *New Roles For Robots*. Obtido em Março de 2012, de http://www.industryweek.com/articles/new_roles_for_robots_10443.aspx

[5] Pushcorp. (s.d.). Obtido em Março de 2012, de New Roles For Robots

[6] ATI Industrial Automation. (s.d.). Obtido em Abril de 2012, de http://www.ati-ia.com/

[7] *Robot Programming for everyone*. (5 de Maio de 2008). Obtido em Abril de 2012, de SME Robot: http://www.smerobot.org/14_automatica/

[8] Simulation Solutions. (s.d.). *Robcad OLP*. Obtido em Abril de 2012, de http://www.simsol.co.uk/robotic_simulation_robcad_olp.php

[9] Juma, R. R. (Junho de 2011). Obtido em Março de 2012, de http://blogdojuma.blogspot.pt/2011/06/primeira-guitarra-eletrica-do-mundo.html

[10] Johnnyquickparts. (21 de Março de 2011). *Hypnotic footage of a guitar being CNC machined!* Obtido em Maio de 2012, de http://johnnyquickparts.blog.quickparts.com/2011/03/21/hypnotic-footage-of-a-guitar-being-cnc-machined/

[11] Workshops, H. (s.d.). *THE HOFNER WORKSHOPS - ELECTRIC GUITAR & BASS GUITAR PRODUCTION*. Obtido em Março de 2012, de http://www.vintagehofner.co.uk/vintagehofner/factory/elect.html

[12] (s.d.). Obtido em Março de 2012, de Alumisonic: http://www.alumisonic.com/custom-1100.html

[13] (s.d.). Obtido em Março de 2012, de Xoxaudio: http://www.xoxaudiotools.com/

[14] Ideia.m. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2012, de Avaguitars: http://www.facebook.com/avaguitars

[15] Lusa, P. (19 de 12 de 2012). Obtido em 12 de Fevereiro de 2012, de www.publico.pt: http://www.publico.pt/Sociedade/empresa-do-porto-vai-lancar-guitarra-em-material-composito_1471685

[16] Franco, R. A. (2008). *Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina.* Lisboa: IST.

[17] *Robotic Cell.* (s.d.). Obtido em Abril de 2012, de Strip Masters: http://www.blaststrip.com/robot.html

[18] Fanuc. (s.d.). Obtido em Abril de 2012, de http://www.fanuc.com/

[19] ABB. (2011). Obtido em Março de 2012, de ABB IRB 2400: http://www.abb.com/product/seitp327/657d58e39c804f64c1256efc002860a7.aspx

[20] ABB. (2011). Obtido em Março de 2012, de ABB IRBP C: http://www.abb.com/product/seitp327/005a650ac570f774c125771c00426051.aspx?productLanguage=us&country=PT

[21] (s.d.). Obtido em Maio de 2012, de Interempresas: http://www.interempresas.net

[22] Motoman. (s.d.). Obtido em Junho de 2012, de www.motoman.com

[23] ABB. (2010). Application Manual Force Control for Machining, Controller software IRC5, Robotware 5.13.

[24] RobotMaster. (s.d.). Obtido em Abril de 2012, de Solving programming challenges: http://www.robotmaster.com/benefits.php

[25] Murphy, K. M., Norcross, R. J., & Proctor, F. M. (s.d.). *CAD Directed robotic deburring.* EUA: Robot Systems Division, National Bureau of Standards.

[26] Groover, M. P., Weiss, M., Nagel, R. N., & Odrey, N. G. (1986). *Industrial Robots: Technology, Programming, and Appplications.* Singapore: McGraw-Hill.

[27] Solvang, B., Sziebig, G., & Korondi, P. (2007). *Robot Programming in Machining Operations*

[28] Matsuoka, S.-i., Shimizu, K., Yamazaki, N., & Oki, Y. (1999). *High-Speed en milling of an articulated robot and its characteristics.* Japan: Elsevier Science SA.

[29] Zhang, H., Wang, J., Zhang, G., Gan, Z., Pan, Z., Cui, H., et al. (2005). *Machining with Flexible Manipulator: Toward Improving Robotic Machining Performance.* EUA: IEEE.

[30] Abele, E., Weigold, M., & Rothenbücher, S. (2007). *Modeling and Identification of an Industrial Robot for Machining applications.* Darmstadt University of Technology, Germany.

[31] Hsu, F.-Y., & Fu, L.-C. (2000). *Intelligent Robot deburring using adaptative fuzzy hybrid position/force control.* IEEE.

[32] Campos, F. d., Filho, A. C., & Pina, A. C. (2010). *Estudo e Modelagem computacional de um robô aplicado em processos de usinagem.* Universidade de São João Del-Rei.

[33] Barbosa, J. P. (2010). *Concepção e Simulação de Célula Robotizada para Operações de Acabamento.* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[34] Rodrigues, N. F. (2011). *Célula Robótica Industrial: Aplicação de Ferramentas CAD/CAM na programação de robôs.* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

[35] Viana, Diogo Gigante (2010). *Desenvolvimento de uma Solução Robótica para Operações de Acabamento de Solas de Sapatos*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

[36] Abreu, P. (Setembro de 2011). *Manual de Utilização RobotStudio 5.14.01.* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

[37] ABB. (2004). RAPID reference manual.

[38] ABB. (2008). *The optimised pre-machining robot.* Obtido em Março de 2012, de http://labintsis.com/roboti/abb-roboti/?lang=en